



美國加州理工學院研習微機電技術

結案報告

研習人員： 楊龍杰 淡江大學機械工程學系助理教授
(NSC89-2217-E-032-001)

研習期間： 中華民國八十九年九月至九十年八月 共一年

補助單位： 行政院國家科學委員會工程技術發展處

目錄

目錄.....	i
誌謝.....	ii
摘要.....	iii
第一章 如何使微加工實驗更方便操作.....	共 8 頁
第二章 EHD 微幫浦的研製.....	共 13 頁
第三章 Gelatin 明膠薄膜製程.....	共 19 頁
第四章 毛細液面前緣流速的探討.....	共 14 頁
第五章 成果彙整.....	共 1 頁
附錄 A：KIC 程式初學者手冊.....	共 9 頁
附錄 B：化學耗材清點.....	共 2 頁
附錄 C：刊登於台大工程學刊之「微型流道熱沉與熱管之製作與實驗」.....	共 19 頁
附錄 D：刊登於國際期刊 Sensors and Actuators A 之「CMOS micro-electro- mechanical bandpass filters」全文.....	共 5 頁
附錄 E：刊登於國際期刊 Sensors and Actuators A 之「Phase synchronization of micro-mirror arrays using elastic linkages」全文.....	共 6 頁
附錄 F：準備刊登於中國工程學刊之「The zeroth order solution of the velocity field around micro comb structures with lateral oscillation」摘要.....	共 1 頁
附錄 G：準備刊登於國際期刊 Sensors and Materials 之「The SOI-like method to reduce the die size of bulk-micromachined sensors」摘要.....	共 1 頁
附錄 H：投稿 IEEE MEMS 2002 會議之摘要「Marching velocity of a capillary meniscus in microchannels」.....	共 2 頁
附錄 I：投稿 IEEE MEMS 2002 會議之摘要「Photo-patternable gelatin as protection layers in surface-micromachinings」.....	共 2 頁

誌謝

本研習計劃能順利完成，首先要感謝國家科學委員會之經費贊助，與美國加州理工學院戴聿昌教授(Dr. Yu-Chong Tai)之熱誠指導；並要感謝國科會工程處前處長蘇炎坤教授、台灣大學應力所李世光教授與張培仁教授、洛杉磯辦事處科學組組長陳耀南博士、王誠一秘書和工程處黃淑瑜小姐等，在敝人完成本次研習期間之一切協助與關照。

感謝研習期間戴聿昌教授之學生們，尤其是姚賜榮先生和劉怡平小姐之細心協助，使敝人迅速習慣該微加工研究群之各種狀況；楊星(Xing Yang)博士在製程及其他專業技術上之指點；徐甬(Yong Xu)先生、陳豫彩(Nick Pornsinsirirak)先生、Ken Walsh先生、Charles Grosgean先生與謝軍(Jun Xie)先生等人在製程機台與技術經驗之傳授；以及 Trevor Roper 先生對設備使用方法之詳細解說；Tanya Hefner 小姐在行政事務上的協助。

更感謝遠在萬里之外的家人們在研習期間之支持與鼓勵，內人及孩子之關懷與魚雁往返，尤使一年的歲月成為加倍的紀念。

另外要感謝洛杉磯 Alhambra 教會的弟兄姊妹們，對敝人一年來的生活照顧，尤其是莊祖康弟兄、莊王美淑姊妹、張兆安弟兄與王午統弟兄，願主耶穌基督的恩、神的愛、聖靈的交通，與我們眾人同在，阿們！

摘要

行政院國家科學委員會(以下簡稱國科會)曾於民國八十八年暑期(三個月)選派張培仁、方維倫與陳世志等三位大學教授，前往美國加州理工學院電機系微加工實驗室進修三個月，之後分就微機電中心管理、微機電製程技術與微機電教育服務等三方面提出報告。八十九年另選派淡江大學機械系楊龍杰助理教授與和春技術學院電子系塗明隆講師，同樣前往同一實驗室，進行為期一年的微機電技術研習與開發。本結案報告即楊龍杰助理教授之研習心得。

本於前一年的研習基礎，本計畫報告人於前兩個月熟習製程環境與設備，並整理出製程心得於第一章。該章之內容一則有益於國內微機電實驗初學者之養成教育，二則對台灣微機電設備與製程技術之本土化提出部分建議。

第二章到第四章，為報告人在微加工實驗室戴聿昌博士指導下，一年之間共同創新開發之研究初步成果。第二章為 EHD 驅動微幫浦的製作，報告人藉實際的研製與測試，釐清 EHD 微幫浦設計原理的限制與微流體測試的技巧。

第三章則嘗試將食品工業之明膠 Gelatin 薄膜應用於微機電領域。報告人在研習期間測試明膠薄膜之機械與化學性質，並初步建議其用來當作面型微型加工之保護層或強化結構。

第四章內容係探討微流道中以毛細作用力驅動液體之基本運動機制。報告人結合第二章之實驗技巧，開發新的實驗方式，探討毛細作用與液面前緣接觸角的關係，預期有相當豐富之後續研究可持續推展。

最後之第五章為成果彙整，將前四章的內容與報告人在一年期間所發表之相關微機電著作，包括三篇國外學術期刊、兩篇國內學術期刊與兩篇投稿國際會議的摘要彙整成表。報告本文之後另有 9 個附錄，補充前文題及之研習細節、發表論文全文或摘要。

派赴美國加州理工學院研習微機電技術結案報告

第一章「如何使微加工實驗更方便操作」

研習期間：89 年 08 月 25 日至 90 年 08 月 24 日

計畫編號：NSC-89-2217-E-032-001

報告人：楊龍杰 淡江大學機械工程學系

E-mail: Ljyang@mail.tku.edu.tw

一、 本章摘要

本章報告 Caltech 在微加工實驗上的一些具體作法，包括：(一)清洗台、(二)光蝕微影、(三)光罩製作、(四)高分子薄膜、(五)其他部分，提供國內微機電研究中心與從事微機電實驗的研究人員學生借鏡參考。

二、 微細加工製程建議事項

筆者接受國科會委派，赴美國加州理工學院 California Institute of Technology 簡稱 Caltech)，在戴聿昌教授 (Dr. Yu-Chong Tai) 主持之微加工研究群 (Micro-Machining Group) 之內研習微機電技術一年。筆者前半年主要在學習如何獨立使用該實驗室之各種微加工設備，發覺與以往在國內之運作方式不大相同，且其特殊做法均有其巧思與方便之所在，故歸納以下之製程建議要點，供國內微機電研究中心與從事微機電實驗的研究人員學生借鏡參考，或可有助於製程工作之順利推展：

(一)清洗台部分

1. 鑷子儘量買粗柄大支的比較好用。
2. 許多情況下，不必真正用鑷子來夾晶片，例如氮氣槍吹乾晶片的動作，用鑷子夾著吹反而危險。4 吋晶片面積夠大了，直接戴好乾淨不漏的手套 (先戴一層 PE 塑膠手套，再戴一層乳膠手套，並且隨時更換)，用手指叨住晶片邊緣，並以主切邊靠放在無塵紙上吹氮氣，安全且省力多了。即使晶片剛從酸液中以鑷子夾出來，稍事 DI water 清洗後，便可儘快換到手上叨住晶片邊緣繼續沖洗。
3. Caltech 不用大量的氮氣吹乾晶片，有更方便省力的方法：此地有一種旋乾機 (spin dryer，如圖 1-1 所示)，很像光阻塗佈機，但是尺寸很嬌小，一次只

能放一晶片，晶片以 DI water 沖完後直接放上去旋乾，接著才送入烤箱中硬烤（烤箱中也只是鋪好無塵紙，晶片直接放上去。）當然這代表要購買烤箱與旋乾機 [廠牌 Laurell 型號 WS-200，網站 www.laurell.com 查得到]，但是氮氣用量絕對可以省很多；氮氣其實沒花多少錢，只是更換氣瓶很麻煩。

4. 四吋晶圓放在方形淺碟子內，進行顯影、去光阻等等製程比較方便，化學溶液用得也比較節省，有助於減少廢液回收的負擔。就近化學容器廠商洽詢應該不難買到，材質只要 PS 的就足夠了。對於酸鹼而言，PS 材質可以抵擋的住，鐵福隆價格太貴了。當然話說回來，對於硫酸-雙氧水溶液 (Piranha)，還是必須裝於玻璃燒杯內，才能操作。

(二)光蝕微影部分

1. 上光阻前要上 HMDS，所謂粘著促進劑 (primer or adhesive promoter)。國內許多人是用 spin-coating 的方式塗佈，塗佈之後整間無塵室很臭，而且有致癌危險；或是像交大半導體中心的做法，使用非常昂貴的噴灑 HMDS 專用真空烤箱（約台幣一百萬多元）。此地做法非常簡單：找一個防 HMDS 腐蝕的塑膠盒（要有蓋子，並且容易開啟的），中央放一個垂直插放晶片的晶舟（每個矽晶片盒都有一副），放在抽氣櫃中。塗佈前先倒些許 HMDS 在盒子內，讓 HMDS 之 vapor 自然揮發充斥其中，然後將晶片插在晶舟格內，覆上蓋子讓 HMDS vapor 滋潤晶片 3-5 分鐘，最後再夾出來塗光阻，效果絕不比 spin-coating 差，而且安全、便宜。
2. 光阻塗佈機沒有真空吸盤（事實上前述 spin dryer 也沒有真空吸附，這些吸盤叫做 non-vacuum chuck 或 rinse/dryer chuck，可參見圖 1-2），改用三個 clamp 固定晶片，clamp 在轉盤邊緣，120 度擺一個，設計極具巧思：其中兩個就是單純的倒 L 型定位銷扣（扣住的唇邊只有 1-2mm 長），第三個定位銷扣則呈現鈕扣的外型，中央有塑膠軸，壓住一個尺寸剛好的 O-ring，使外徑約 5mm 的塑膠旋扣可以自由旋轉。晶片不能任意方向固定在轉盤上（不是硬壓扣上去的），必須先將主切邊（外徑較小的部份）對準第三旋扣鑲進去，使晶片能平貼在轉盤上，被三 clamp 圍住，不過此時晶片並未牢固；箍住的辦法是旋轉晶片，讓晶片主切邊位置轉離第三定位旋扣，因為晶片外徑恢復成 4 吋，自然晶片就緊扣在第三旋扣之下。（國內一些真空轉盤邊緣上也有 3~4 支夾爪，功用類似。）
3. 光阻塗佈機沒有真空吸盤有以下好處：

(1) 不會吸入光阻損壞機器（國科會北區微機電研究中心發生兩次光阻塗

佈機故障，起因於學員使用破片，致使光阻吸入機器中)；晶片幾吋都可以，但是使用破片—除非是昂貴的 GaAs 晶片，否則已不符現行微加工製程技術之要求。

(2) 晶片太薄也沒有被吸破的問題。

(3) 即使晶片背面已經用 KOH 吃出方形凹槽，也不用擔心凹槽底部的矽質薄膜會被吸破，或真空吸附不住，而妨礙往下光阻製程之進行。

(4) 不需要慢轉速控制部分：光阻倒在晶片上呈現 2/3 滿之後，用手撥弄轉盤兩三圈，差不多就佈滿晶片，所以機器只要直接控制高轉速 (通常是 4000rpm 以下) 與時間 (一分鐘之內) 就夠了。



圖 1-1 spin-dryer。



圖 1-2 non-vacuum chuck。

(5) 若晶片正面曝光顯影完，要以 BOE 溶除氧化層的蝕刻窗口時，為了避免另一面氧化層也被蝕去，常在晶片背面塗佈光阻以保護之。以往因為塗佈機的真空常將光阻從晶片正面吸到背面造成污染，所以大家只好用毛筆直接在晶片背面塗光阻，不僅吃力，而且附著效果不佳 (另一法是使用 Teflon 夾具保護背面氧化層，使用上也是不方便)。若像此地的塗佈法，因為沒有真空吸附，只要轉盤乾淨，塗背面光阻—甚至雙面先後塗佈光阻，都是輕而易舉的事。(另有一不塗背面光阻也能保住背面氧化層的方法：平擺晶片，直接用滴管將 BOE 一點一點地滴在晶片正面要將氧化層開洞的位置 [晶片正面已經有定義好的光阻]，小心不要讓 BOE 滲到背面就行了！不過筆者不建議這麼做，處理 HF-based solution 還是小心為要。)

4. 由於越來越多人使用厚光阻 (只要超過 2 微米厚都算是), 筆者的經驗顯示, 顯影後同一晶片上的光阻厚度, 與圖形的線寬有關, 尤其尺寸越接近膜厚的圖形, 更應該小心因應。以此地 AZ4620 與 AZ4400 為例, (AZ4620 以 2000rpm、60sec 塗佈, 100 度 C 軟烤 20 分, 400nm G-line 曝光 2 秒, AZ400K: 水=1:4 顯影 4 分鐘。AZ4400 以 4000rpm、40sec 塗佈, 100 度 C 軟烤 20 分, 400nm G-line 曝光 1 秒, AZ351: 水=1:3 顯影 1.3 分鐘。) 同一晶片上不同線寬的光阻厚度不一, 如表 1-1。

5. 使用光阻不必太節省, 滴管是根本不需要的東西, 只會造成污染。平時直接將光阻裝在 200-300cc 的乾淨容器內, 用時直接倒出來就行了。反正光阻有效期限只有 0.5-1.0 年, 太節省反而造成過期不能用。另外, 每次做完光蝕術後, 必須把塗佈機內之光阻全部清除乾淨

(之前將塗佈機內壁鋪一層鋁箔紙, 做完當天直接丟掉最省事); 無塵室內光阻味道太濃有礙健康。

6. 清潔光罩的方式: 先泡丙酮 (ACE), 然後立即浸入異丙醇 (IPA) (甲醇少用為妙; 甲醇有毒性), 最後以 DI water 沖洗, 接著旋乾或吹乾, 目視乾淨後, 予以軟烤 10~20 分鐘。
7. 因為許多顯影劑都是強鹼 (例如 NaOH/ KOH/ TMAH 等成分, 很像矽晶的非等向性腐蝕液), 所以進行鋁線蝕刻前的光阻顯影, 時間不能超過太多, 否則露出來的鋁會減薄。[設計製程時要事先注意!]
8. 建議訂購一支 UV 光能量計 (power-meter), 用來測定光罩對準曝光機中汞燈的紫外光能量 (exposure dosage)。汞燈能量會隨使用時間而有所變化, 每次開機後都要量測核對, 並作為決定光阻曝光秒數之參考依據。

表 1-1 同一晶片上不同線寬圖案的光阻厚度。

線寬 (微米)	AZ4620 光阻厚度 (微米)	AZ4400 光阻厚度 (微米)
100	6.43	2.65
90	6.07	2.64
80	6.67	2.63
70	6.45	2.43
60	6.32	2.45
50	6.16	2.40
40	6.37	2.52
30	5.92	2.51
20	5.66	2.30
10	5.60	2.25

(三)光罩製作部分

1. 除了 L-edit 與 AutoCAD 之外，不妨了解其他 CAD 繪圖軟體(如 Caltech 使用的 KIC 程式；初學手冊參見附錄 A)是否也可以輸出成光罩佈局 (mask layout) .ps 格式 (post-script file) 或其他的印刷出圖公司可以辨讀的格式 (如 *.eps)，如此可以直接畫出光罩佈局，以 3386 dpi (或其最佳) 的解析度，在透明膠片上印出最小線寬為 7 微米 (或稍粗) 的光罩圖形，然後回來用光罩曝光機，將透明膠片的圖形轉寫到光罩玻璃上 (筆者認為：未來高解析度的出圖設備普遍之後，國內各實驗室可以自行製作大部分線寬較粗的光罩，以減輕交通大學半導體中心或 NDL 的代工負擔，並大幅縮短製作光罩的時間)。
2. 轉寫到光罩玻璃的程序：
 - (1) 在無塵室中將光罩圖形裁下來 (不要折到膠片或使之拉撐變形，並記得戴手套剪。)
 - (2) 準備未曝光的光罩玻璃 (有現成待售，一片約台幣 1000 元，上面有一層 2000 埃厚的 Cr，以及塗敷好並軟烤過的光阻 AZ1518。有金屬蒸鍍機的單位也可以自己製備，不過要有光罩玻璃；將以前不要的光罩，以 CR-7 洗掉圖案，可以當作應急之用。)
 - (3) 在結實的平台，先放好未曝光的光罩，光阻面朝上，疊上具光罩圖形的膠片，印面朝下 (與光阻面對面直接接觸)。以另一片沒有圖案的透光玻璃放在最上方，稍事對準後，用力壓實角落，使膠片與玻璃緊貼，然後放入曝光機 (I-line 365nm 或 G-line 400nm UV 光波段均可) 進行曝光 (詳細動作可按不同曝光機台之操作特性而決定。)
 - (4) 顯影、硬烤、用 CR-7 蝕洗出光罩圖形。若線寬在 10 微米以內，時間控制要精確；從 CR-7 中撈出並浸入 DI water 之前，務要泡一下稀硫酸 (< 5%)，以免 CR-7 繼續 undercut 圖形邊緣。
 - (5) 最後以丙酮去掉光阻，泡 IPA、DI water，吹乾，軟烤五到十分鐘。
3. 目前各研究群 (甚至同一研究群的不同人位) 之光罩對準記號五花八門，操作光罩對準機的技巧也不一致，對機台損傷比較嚴重。同一研究群應該整合意見，設計一套共用的對準記號在光罩東西或南北兩端 (或依循光罩對準機顯微鏡頭的較方便來回移動方向)，而無須每一個 sensor or device 都畫十字。

(四)Parylene 高分子薄膜

本部份報告由戴教授的學生姚賜榮先生所發展的一種薄膜防止沾粘的技術 (thin-film anti-stiction tech)。其實這是配合 Caltech 所謂 Parylene 的低溫薄膜成長製程。

Parylene 是一種高分子材料，買來時呈現雙體 (di-mer) 的型式，經過 SCS 公司製作機台的加熱後，揮發至較高溫的反應室中解離成單體 (mono-mer)，然後送至成長爐中，以鏈狀堆積在室溫的晶片或基板底材上，因為室溫成長，不管長多厚 (10um 沒問題，呈透明狀)，對於先前長在晶片上的結構不會有任何傷害，最重要的是可以利用光阻作為犧牲層，讓整個面型加工變得非常單純。

雖然光阻可以直接用丙酮去掉，但因為液體總有表面張力，還是會將懸浮的 Parylene 結構往下拉，與底材黏在一起。

姚先生的做法是在光阻底下先鋪一層薄薄的非晶矽 (amorphous silicon)，整體截面如圖 1-3 之上半所示，雖然去掉光阻時 Parylene 還是與非晶矽粘住 (圖 1-3 之中圖)，但其後利用 BrF_3 (需要特殊的設備) 只吃 silicon 不吃 polymer 的特性，不僅去掉非晶矽，也懸浮起 Parylene 結構 (圖 1-3 之下圖。)

Parylene 結構的 $E=2\text{Gpa}$ ，強度比矽差很多，但因為屬於彈性材質 (Poisson ratio $\rightarrow 0.5$)，所以大變形沒問題。國內各微機電研究中心可考慮以後增添類似的高分子材料製程與設備，但有以下兩點應同時注意：

- (1) 非晶矽是以濺鍍方式成長，溫度 200°C 比 PECVD 的 350°C 低很多 (各中心現有之濺鍍機可考慮加上 silicon target，並建立製程參數。) 即使不增加 Parylene 製程 (因為要同時購買 Parylene 鍍膜機與 BrF_3 蝕刻機)，至少非晶矽還能當作玻璃腐蝕的保護罩幕。

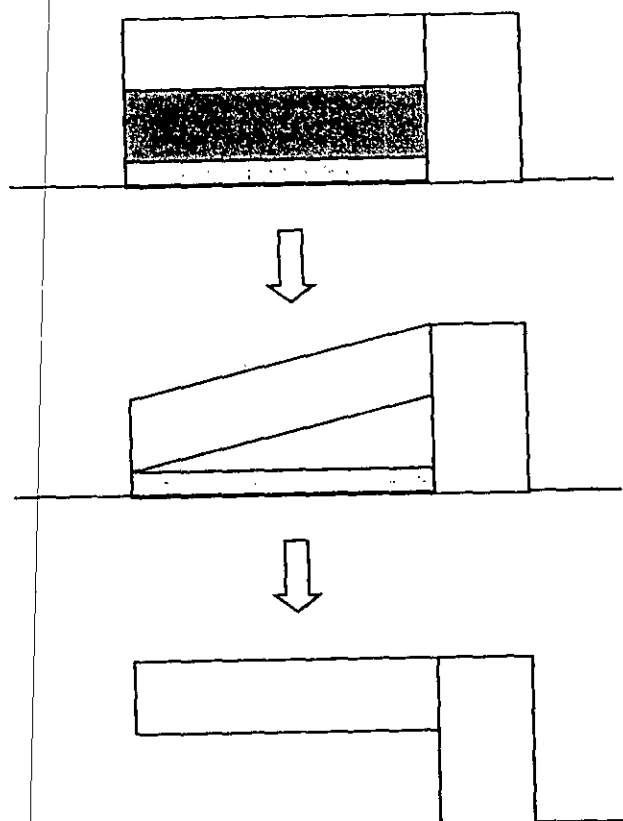


圖 1-3 Parylene 高分子薄膜防止沾黏法。

(2) 各中心若覺得現有 RIE 工作負擔太重，可考慮添購一部較便宜的 Plasma Asher，也配兩條管分別連接 O_2 與 CF_4 , SF_6 三種氣體 (不需用 mass flow control，此地用旋閥控制氣壓 mTorr 值而非 sccm 值)。因為各中心已經把昂貴的廢氣處理 (scrubber) 系統都做好了，再多一部 100 萬的 Asher，可常常對晶片表面作處理 (descum)，保證晶片表面恢復為親水性 (hydrophilic)，去除細緻圖形邊緣之殘餘光阻，減少多道製程清潔度變差的問題，同時多了一些新製程操作的可能性，應該很值得。

(五)其他

1. 所有需要雙面加工晶片的一般程序如下：

- (1) 使用特殊的雙面曝光夾具，先後曝光，同時顯影、硬烤，然後送入乾蝕刻機，以 SF_6+O_2 (10:1 的比例)，直接在晶片雙面刻出對準十字記號 10 微米深 (若已經有雙面對準儀，重複做兩次曝光與乾蝕刻便行了)。
- (2) 起始清潔晶片 (initial clean，事實上就是泡入 Piranha 十分鐘，BOE 10~20 秒。)
- (3) 進行 1.5~2.0 微米厚之氧化層成長。
- (4) 晶片背面蝕刻洞口的定義。
- (5) KOH 腐蝕 (通常剩下 25 微米的矽質薄膜厚度)。
- (6) 其他面型加工與鍍膜定義程序。
- (7) 塗佈光阻保護晶片表面，並將晶片切割成標準的 1cm 見方大小。
- (8) 以 BrF_3 或 XeF_2 進行最後晶片背面矽質薄膜的貫穿 (若使用者要留下矽質薄膜，則不需此道步驟)。

2. 電漿去光阻機 (Plasma etcher，此地是所謂 PE-II 的機台，並不具備非等向性乾蝕刻的功能，價位遠低於 RIE，後續水解槽與廢氣設施可與 RIE 共用) 對於半導體與微機電製程都非常關鍵並重用，微機電研究中心只擁有一部昂貴的 RIE 絕對不夠。其用處如下：

- (1) 利用 CF_4+O_2 電漿作 KOH 非等向性腐蝕之保護層 (nitride/ oxide) 開窗。
- (2) 利用 SF_6+O_2 電漿直接在矽晶片上蝕刻對準十字的記號。
- (3) 使用 O_2 電漿去除光阻 (resist stripping)，可以節省許多有機溶劑或 Piranha

的用量。

(4) 作 BOE 開窗前之光阻邊緣清潔 (descum)。

3. KOH 非等向性腐蝕液之溫度不妨降至攝氏 58 度，不必太高，以免氧化層消耗太快 (1 微米厚的氧化層在 80 度的 KOH 中只能保護晶片 3 小時)；當然如此一來矽晶的腐蝕速度也會變慢，不過只要 KOH 裝在密閉容器內 (reflux)，保證 KOH 濃度不變，則腐蝕時間拉長並無大礙。另外應將氧化層增厚至 1.5 或甚至 2.0 微米，如此將使 KOH 輕易地在 15 至 24 hour 之間蝕穿矽晶，而氧化層依然存在。
4. 同一研究群有必要研擬共同的晶粒 (die) 與蝕洗電路板 (PCB) 尺寸，以便晶片製作完成之後的晶片切割或打線，不會有節外生枝的問題。
5. 微加工實驗室必須排定化學耗材清點 (chemical count) 的輪值表，防止耗材用盡短缺，中斷製程研究的推展。Caltech 微加工實驗室的耗材清點表，請參見附錄 B。

三、 本章結論

本章的技術報告不限定在某特定微機電元件之製作，而將 Caltech 微加工實驗室異於筆者經驗的實驗細節部分，整理提供國內微機電先進與研究者參考。各微機電實驗室可按其不同之技術需求，在「安全→環保→效率」的優先考量順序下，各自發展具其特色之設備與製程。

註：本章內容已發表並收錄於 2001 年 4 月 (交通大學舉辦) 全國微系統科技協會年會暨微機電技術研討會論文集之中。

派赴美國加州理工學院研習微機電技術結案報告

第二章「EHD 微幫浦的研製」

研習期間：89 年 08 月 25 日至 90 年 08 月 24 日

計畫編號：NSC-89-2217-E-032-001

報告人：楊龍杰 淡江大學機械工程學系

E-mail: Ljyang@mail.tku.edu.tw

一、前言

由於筆者有興趣於從事微生醫方面之研究，加上加州理工學院微加工研究群近年來經常使用高分子薄膜 Parylene，製作微細結構，故筆者的第一個研究課題，便是製作 Parylene 材質的微管道，並直接在流道之中蒸鍍金屬電極，進行所謂電流體驅動(electro-hydro-dynamic; EHD)微型幫浦。

二、EHD 幫浦簡介

根據 S.-H. Ahn and Y.-K. Kim 在 1998 年 Sensors and Actuators A, pp.1-5 上所發表”Fabrication and experiment of a micro ion drag pump”文章，其利用直流電驅動之平面電極對(個別寬度與間隙為 100 微米，電極對與電極對之間距拉大到 200 微米)，來推動非導電的酒精。在高 100-200 微米、寬 3mm、長 30mm 的流道中，施加 60-100 伏特直流電壓以產生每分鐘 40-60 微升的驅動流體積流速。該論文之微流道與進出口，係先以矽晶體型微加工法(bulk-micromachining)製作，再與具有驅動柵狀電極之玻璃(用 epoxy)粘合而成。

電流體驅動幫浦是以電場均勻施加能量於具離子之流體上。傳統大尺寸流體之驅動電壓高達數千至數萬伏特，所以只能用於諸如變壓器(transformer)內冷卻油質之帶動循環。然而隨著尺寸的縮小，靜電力場相對隨之效應增強，可以有效

帶動非導電性流體(導電度 conductivity 在 $10^{-9} \sim 10^{-14} \text{S/cm}$ 為宜)，產生之流速若依賴一般壓差式的驅動流體方式，等效於數至數十大氣壓之進出口壓差。

筆者以下試以單純之 Parylene 面型微加工製程，製作微流道，並將 EHD pump 之交叉柵狀電極 (inter-digital electrodes)，安插於流道中，以便直接接觸流體，並施加電場。製程晶片之剖面見圖 2-1 之示意。由於與電解式驅動幫浦 (electrolytic pump，直接加電壓電解水，利用產生之氣體，推動流體運動) 類似，即其電極皆須與流體直接接觸，故製程均相同，而可以整合於同一批光罩佈局中。

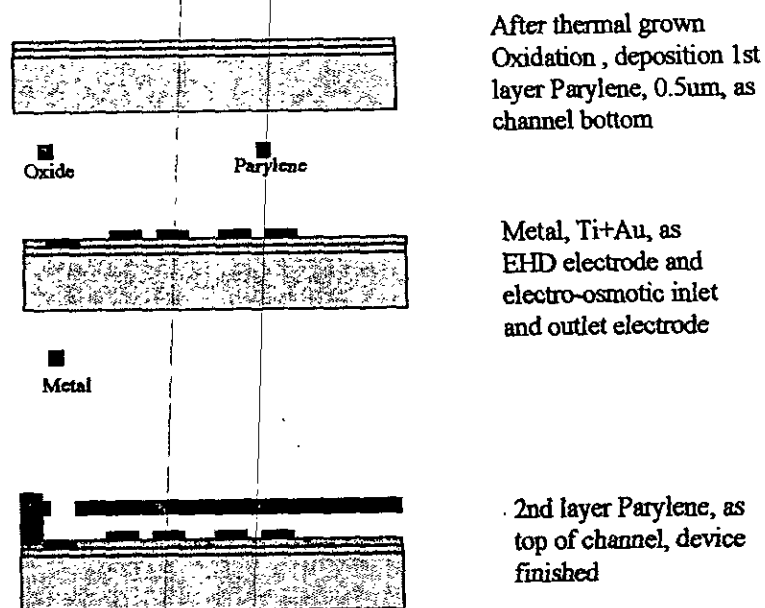


圖 2-1 電流體驅動幫浦製作程序。上圖：成長氧化層與 Parylene，並將下層 Parylene 開洞；中圖：在開洞的氧化層上蒸鍍電極金屬；下圖，鋪上光阻定義出犧牲層，接著成長第二層 Parylene，並將該頂層 Parylene 予以成型，同時打開微流道出入口，以丙酮去除光阻犧牲層。

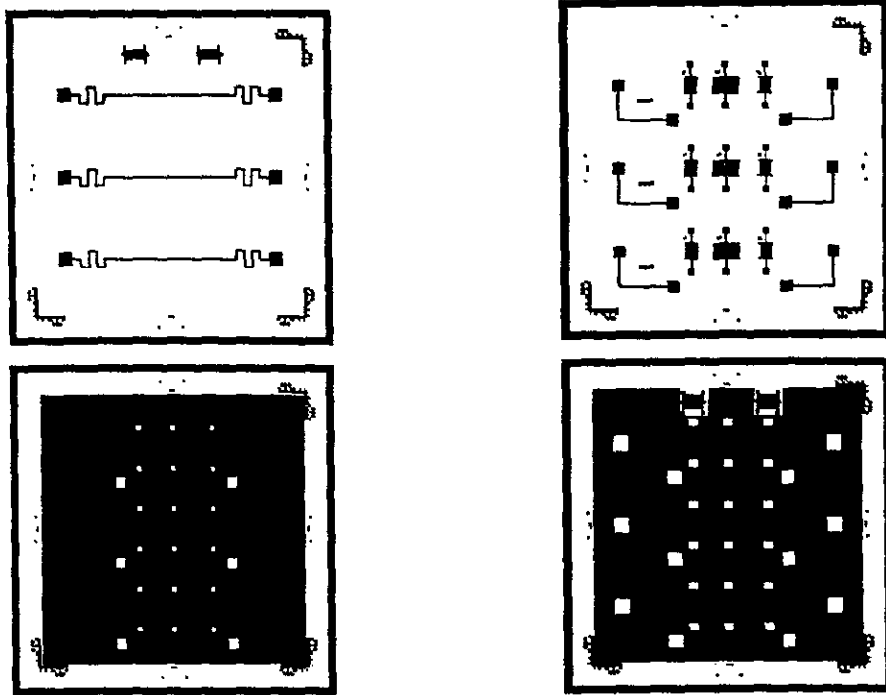


圖 2-2 光罩佈局。依製程順序應為：左下圖，將下層 Parylene 開洞。右上圖，在開洞的氧化層上蒸鍍電極金屬。左上圖，鋪上光阻犧牲層。右下圖，將頂層 Parylene 予以成型，並打開微流道出入口。

由於面型微加工法之厚度侷限在 10 微米以內之數量級，自然不能像前面文獻所述，製作深度高達 100 微米的微流道；寬度也不能寬到數百微米，以免微通道上壁塌陷與底材接觸。當然電極只能用一般蒸鍍法得到數千埃之厚度，而無須以電鍍法製作數微米高之電極。綜而言之，筆者所研製者為縮小版之 EHD pump。其驅動流體之性能預估，可參考下式：

以下圖 2-3 (a)~(d)是製作完晶片，經過切割後，一一放入丙酮去除光阻前後之元件局部放大影像；圖 2-5 與圖 2-6 則是晶片整體外觀與進出口景象：

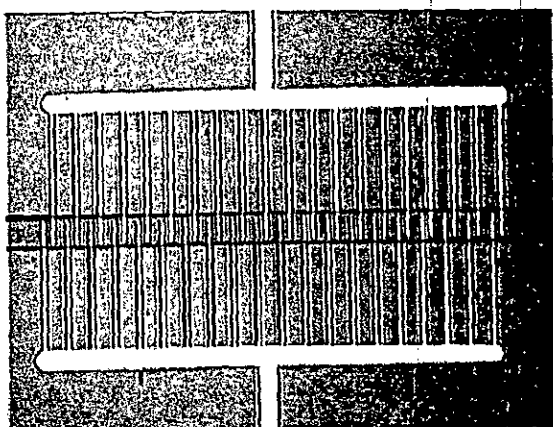


圖 2-3(a) EHD pump 未去除光阻前。

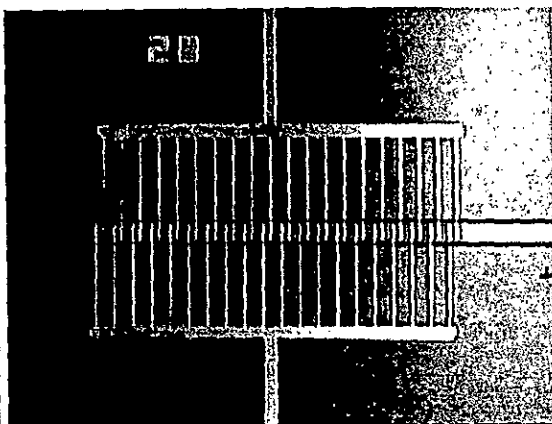


圖 2-3 (b) EHD pump 去除光阻後。

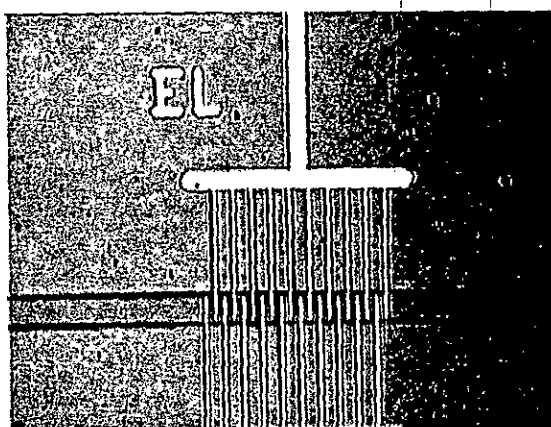


圖 2-3 (c)電解 pump 未去除光阻前。

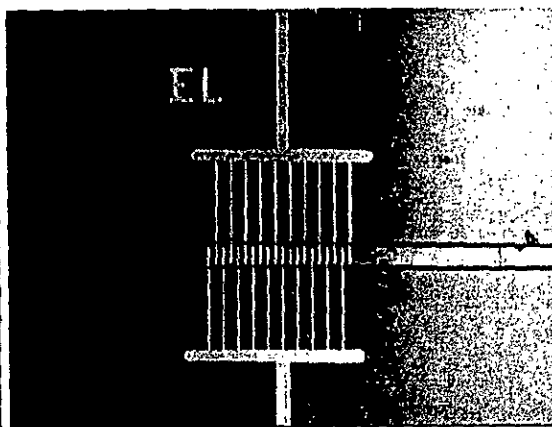


圖 2-3 (d) 電解 pump 去除光阻後。

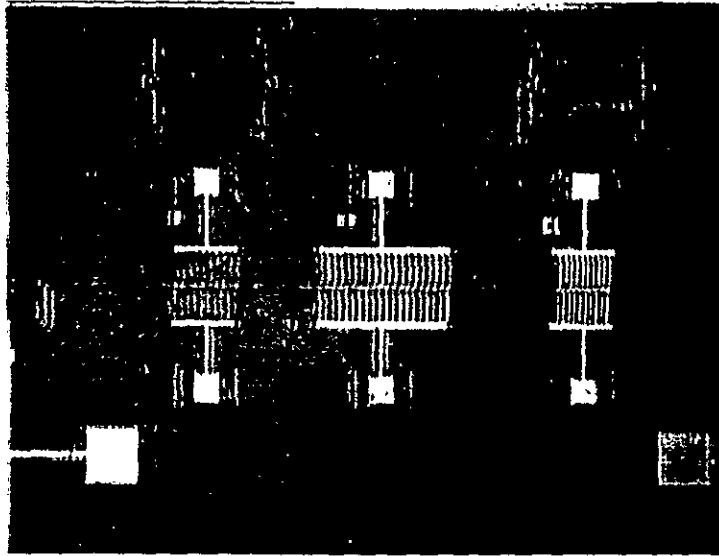


圖 2-4 整體晶片上視圖。中央透明管狀物是 60 微米寬的微流道。左側兩部分梳狀電極是 EHD pump，右側是電解 pump。最上方是 Parylene 材質的 comb structure。

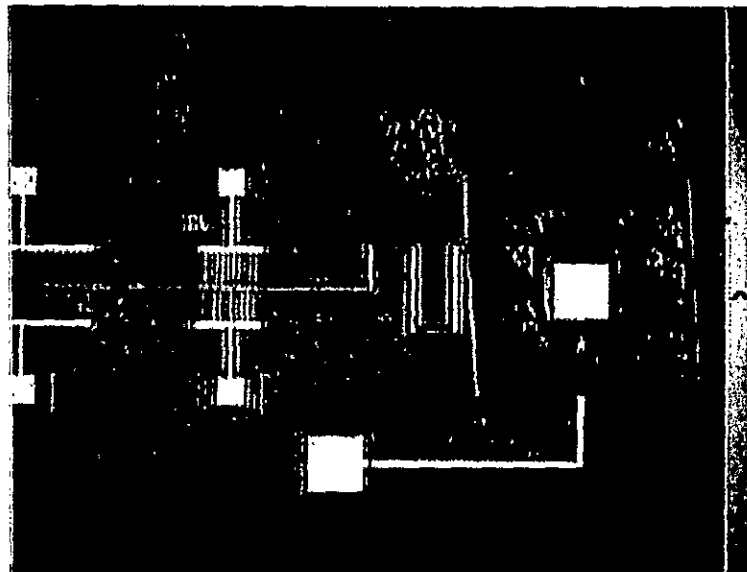


圖 2-5 微流道進出口端的景象。不透明的方形框架是以 silicone rubber 材質製成之 small seal-ring，用來當作工作流體之儲存槽(reservoir)。

三、有關 Parylene 材質微梳狀結構(comb structure)之研製

梳狀結構的設計如下：樑長 80-120 微米不等，樑寬 20 微米，樑厚(就是最上層 Parylene 的厚度)10 微米，樑與樑間距 10 微米，樑與底材之間隙(就是犧牲層光阻的厚度)4-10 微米不等。由於第一次順便與上述兩種 pump 製作在一起，故遷就相同的製程，先不在光阻之下鋪上濺鍍的非晶矽薄膜，並直接嘗試 Parylene 製作 comb 結構的效果。

由於 Parylene 太厚，用 O_2 plasma 蝕刻費時，所以先試用 3.5 微米的 Parylene，當然如此一來，抵抗垂直方向位移的剛性差了很多，光是慣性矩(moment of inertia)便減少為 10 微米厚設計的 $1/27$ ！

圖 2-5 與圖 2-6 之結果如預期，整個 comb 結構都黏死在底材上，我們不用探針驅動，光由顯微鏡下的 fringe pattern，便很清楚發生了什麼事！原因一為上述 Parylene 厚度不夠，二則也發現長時間 O_2 plasma 蝕刻(大於 20 分鐘)，有嚴重的側向蝕刻以及角落效應：comb 寬度由 20 微米減為 15 微米以下，所以與設計尺寸相差很多；角落效應是指角落的側向蝕刻特別嚴重，所以造成 comb 結構之根部變窄，抵抗變形的剛性變差，特別容易被液體的表面張力拉下來。

改進法如下：

1. 加上 Caltech 已有之防沾黏法。(請參考第一章第四節『Parylene 高分子薄膜』的說明。)
2. 加厚頂層 Parylene 厚度。
3. 用鋁金屬作為頂層 Parylene 蝕刻 mask，增長 masking 時間(光阻擋不住)。

4. 視側向蝕刻的程度，前置修正到光罩的設計，尤其注意角落處的光罩，不能作單純的 90 度彎角，必須作鈍角外伸的設計。

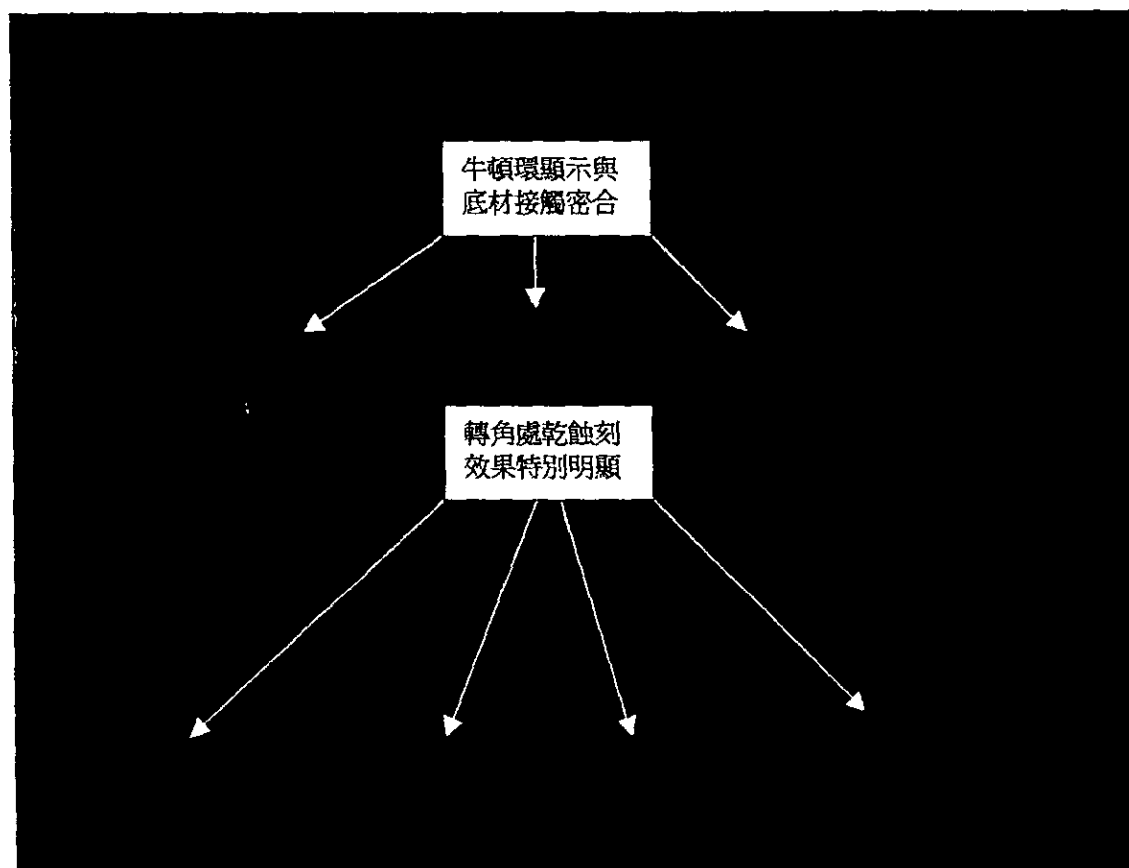


圖 2-6 梳狀結構成型並去除犧牲層後之俯視圖。

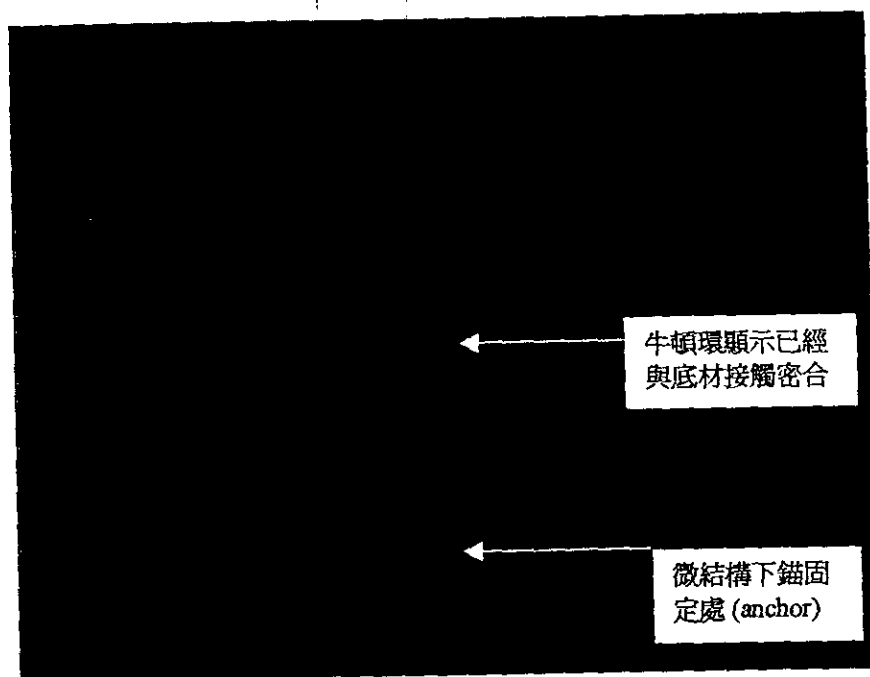


圖 2-7 梳狀結構振動樑成型並去除犧牲層後之俯視圖。

四、EHD pump 的初步測試

微流體實驗通常比微加工製程複雜繁瑣，以本晶片為例，到晶片切割為止之製作僅費時3~4天，但是測試歷時近三週。茲將測試心得整理如下：

1. 清除微流道中的光阻：

光阻在本製程中作為犧牲層，當頂層 Parylene 堆疊並且乾蝕刻成型之後，流道的進出口也同樣開窗，理當灌入丙酮 (Acetone)，便能清除光阻，而留下中空 Parylene 材質之微流道。但因為本設計之微流道的長度 (1cm) 與寬度 (60um) 相差過鉅，所以一則丙酮要費時十數小時才能完全溶散深處的光阻，

二則溶散的光阻又要花費十數小時，才能從流道深處擴散出來。常見的情形是一直無法徹底清潔光阻。筆者一共嘗試以下幾種技巧：

甲、先泡完丙酮 10 小時後，再泡入異丙醇 (IPA, isopropanol) 10 小時，其間各更換有機溶液數回，防止溶散出來的光阻又反擴散進去。結果許多混合的殘渣仍然留在流道中，尤其進出口的情況最為嚴重，許多進出口根本阻塞不通。而且歷經進二十小時的有機溶劑浸泡之後，Parylene 有腫脹 (swelling) 甚至脫層 (de-lamination) 的現象；尤其原本與金屬線路疊合的所在，特別嚴重。雖然事後予以軟烤而恢復密合，但表面平整與乾淨程度已經大不如前。

乙、減少浸泡丙酮的時間，一旦發覺丙酮已經滲入最裏層光阻，便將整個燒杯再浸入超音波 (ultrasonic) 振洗機之中，增快光阻溶散出來的速度。筆者嘗試 5 與 10 分鐘二例，發覺 5 分鐘不夠乾淨；10 分鐘夠乾淨，但是部分金屬線也已經被震斷。

丙、放棄超音波振洗機，改泡入光阻清洗劑 ST-22，100 度 C，50 分鐘；繼之以 80 度 C 純水，100 分鐘，然後使其自然晾乾。雖然 Parylene 仍有腫脹現象，但是軟烤後恢復密合，而且微流道進出口不再阻塞。

2. 將微流道灌滿純水，以探針施加直流電壓：

純水導電度約為 10^{-8} S/cm，可能是 EHD pump 可驅動流體之導電度極限。首先是導水入流道，純水與晶片之 Parylene 恐水性 (hydrophobic) 表面沾黏性不佳，而呈水珠狀鼓起於流道進口，但若是微流道已經中空，仍會因為毛細現象，迅速將純水吸入微流道之中。水的蒸發速率遠慢於有機溶劑，所以有較充分的時間進行量測，而不採上述灌滿流體的方式。經施加電壓發覺，只

要電壓一達到 4 伏特，立刻有大量氣體產生，將流道的液體完全排擠到兩側（與電極之正負極性方向無關）。經判斷是發生電解水的反應。而且若移動探針到原來設計當作電解 pump 的電極，也是一樣在 4 伏特時，發生電解水的反應。因為 EHD 不可能在 4 伏特之下奏效，所以本直流面型加工的 EHD pump 設計不適用於純水的驅動。

試問先前文獻的 EHD pump 為何可以運作？原來其加工技術是體型微細加工，不管是流道或電極的尺寸，都大於此地面型加工元件十倍以上，所以雖然也發生電解水現象，但是氣泡的尺寸相對很小，不至於像此地一般完全阻塞住流道，故可以持續加大電壓，一直到 EHD 效應可以驅動流體的地步。

3. 將晶片全部泡於有機溶液中，以探針施加直流電壓：

由於有機溶液（丙酮與異丙醇）蒸發太快，silicone rubber 材質製成之 small seal-ring 儲液槽，並不能提供太久之實驗時間（要避開探針阻礙，將小小的儲液槽以針筒點上溶液，必須花一些功夫與時間練習，並且發覺好不容易點好一滴溶液，卻在不到 1 分鐘內完全蒸乾）。有鑒於有機溶液並不導電，索性改變方式，將晶片固定於培養皿中，先將探針接觸於電極上，然後把培養皿注滿有機溶液。要注意若微流道中仍有氣體，仍不可貿然將晶片蓋滿溶液，以免氣泡陷於其中無法逸出。

本測試方式最大毛病在於探針周圍會吸附液體，造成晶片附近液面不平整，而妨礙顯微鏡之觀察（通常看到扭曲的影像）。除非能夠將一對探針以對稱的姿態擺放。

流體運動因為透明，必須藉助加入微顆粒（粒徑 0.12-3.0 微米）在溶液之中，隨流體運動而為吾人觀察得到。本部分測試在放入顯像顆粒之前便試行

加上電壓，發現在 40-60 伏特之間，微流道中會突然產生大量氣泡，與電解 pump 作動現象相同，茲判斷也是因為有機溶液之中含有 1~5 % 的水分，被電解產生氣泡所致。

五、本章結論

1. 本微型 EHD 幫浦之微流道與電極外型均已製作完畢。不過受限於沒有純粹(去水)的非導電受驅動液體，所以一通電的結果便產生水的電解，加上微流道尺寸較小，電解產生的氣泡立即充塞於微流道之中，造成 EHD 驅動失效。
2. 即便將本 EHD 液體驅動元件改為電解式幫浦使用，除非配合單相閥門的製作，否則所產生的氣泡將任意地往上、下游推擠液體，而根本無法控制液體驅動的流量。
3. 本實驗暫以直接滴定液體於流道進口的方式，提供 EHD 幫浦所需之被驅動液體，不過因為量少，極易用盡；而且容易沾染灰塵吸入微流道中，造成阻塞。所以在現實作法上，應該套接進出口管路，尤其必須連接到上游的儲液槽(reservoir)，並在其中裝設過濾裝置(filter)。為此，矽晶背面的進出洞口(KOH)腐蝕加工，也成為無可避免的製程步驟。

補充一：以 Macintosh 主機擷取顯微鏡影像之方式：

1. 將樣片置於顯微鏡下，調清楚影像之後，連結至 Macintosh 主機。
2. 拉下主選項(蘋果符號)，選擇 Apple Video Player，出現與顯微鏡下相同之影像。
3. 在右方同時出現的小對話框中按下 freeze，然後 save，輸入檔名並存放於適當位置(通常是在 Macintosh 主機之 desktop/power users 下另開檔案夾)。
4. 因為檔案體積太大，要改成 JPEG 格式。啟動 Photoshop 軟體。
5. open 剛剛儲存之影像凍結檔案，save as 成 JPEG 的格式，記得輸入的檔名中，要含有.jpg 的附名。
6. 啟動 Fletcher 程式，進入 File 之 newconnect 次功能，在出現的對話框中，依序填入：HOST: sense，USER ID: *****，PASSWORD: *****，DIRECTORY: 空白，並在接續出現的檔案交換視窗中，按下 put 鍵，由先前 JPG 圖檔之所在 (desktop/power users/**.jpg)，複製到個人的磁碟位置之中。

補充二：Fluid pumping Mechanism

(Madou, "Fundamentals of microfabrication", 第九章, 433 頁起)

所謂的 EHD pumping 的驅動力，是來自於電場與流體中帶電顆粒的交互作用，與電滲式電泳式一樣不用移動件 (moving parts) 便能驅動流體。該交互作用指電場先帶動流體中的帶電顆粒，然後再傳遞動量給整個流體；此效應對於大尺寸流動不甚明顯，但在縮小尺寸之後效應大增。而 EHD 驅動成功的先決條件是，被驅動流體中必須有能夠被感應成自由電荷的帶電顆粒，而且此地驅動的是連續性的流動，所以該感應自由電荷必須源源不斷地產生出來；為此，流道中的必須存有導電度 (conductivity) 或是介電性質 (permittivity) 的梯度，否則經過一段時間 (relaxation time) 後，自由電荷便快速消滅。一個營造電性梯度的方法是讓微導電的流體或流道前後存有溫度差異。EHD pump 最大的缺點在於不能應用於導電良好的流體驅動，如生醫環境之中 (biological environment)。

派赴美國加州理工學院研習微機電技術結案報告

第三章「Gelatin 明膠薄膜製程」

研習期間：89 年 08 月 25 日至 90 年 08 月 24 日

計畫編號：NSC-89-2217-E-032-001

報告人：楊龍杰 淡江大學機械工程學系

E-mail: Ljyang@mail.tku.edu.tw

一、研究緣起

W. A. Little 在 Rev. Sci. Instrum. 55(5), May 1984 pp.661-680 的文獻“Microminiature refrigeration”中，提到以噴砂法 (abrasive blast)，衝擊裝在車床轉盤之玻璃板上，以加工出流道凹槽，因為文章中的流道尺寸並不是非常小（數十至數百微米寬），所以只使用 27 微米粒徑的氧化鋁粉 (Al_2O_3 powder)；至於遮掩的罩幕 (masking) 材質，是食品工業中常用的明膠 (Gelatin)。文章中顯示，Gelatin film 可以有效並長時間阻絕氧化鋁粉的高速衝擊，足夠加工出 2-100 微米深的玻璃流道。

二、Gelatin 簡介

當吾人進一步查驗 Gelatin 的成分與製法時，發覺極為有趣。人類使用 Gelatin 的歷史已經超過 6,000 年，其主要提煉自動物性組織如牛骨或豬皮，純脆屬於膠原質 (collagen，哺乳動物組織 [mammalian organism] 中有 33% 均屬此成份) 類的蛋白質 (protein)。Gelatin 具有 18 種氨基酸 (amino acid)，含有人體所需要 10 種氨基酸中的 9 種 (只有 Tryptophan 氨基酸須從別處攝取)。Gelatin 因為極易溶於水溶液中，故極易為人體消化吸收。其不含油脂 (fat)、碳水化合物 (carbohydrate)、嘌呤 (purine，尿酸化合物之基元) 或膽固醇 (cholesterol) 等飽和性化合物 (preservative)，屬親水性 (hydrophilic) 物質，與大部分材質粘著 (adhesion) 良好。而且具有可逆熱塑性 (thermo-reversible)，換言之，其平常以果膠固體狀存在，但只須稍微加熱 (40-50°C) 便融化，故方便於食品之定型製作，一般在果凍 (jelly)、小熊軟糖 (gummy bear)、凝膠 (marshmallow)、優格 (yogurt)、慕斯 (mousse)、酸乾酪 (cottage cheese)、焦糖甜點 (caramel

sweets) 等，都看得到其蹤跡。並且還應用於製藥業 (pharmacy) 的膠囊 (capsule)、照相底片 (photographic film) 中之膠膜、化妝品的果膠成分等。[請參考 GELITA 跨國公司集團之網站說明：www.gelita.com/DGF-english]

三、Gelatin 光阻製備

Gelatin 可以經由加入鉻素 (chromate) 成為對光敏感 (photo-sensitive) 的物質，且是一種負光阻 (negative resist)。按照先前 paper 的提示，其製備程序如下

1. Dissolve 7g Gelatin in 75ml water at 40-50°C.
2. Filter to remove bubbles.
3. Add 0.3g Potassium dichromate. ($K_2Cr_2O_7$)
4. Store in amber bottle. (Shelf life: 1 month.)

至於曝光顯影的程序如下：

1. Apply (Spin coating or dip coating) to clean substrate with eyedropper at 40°C under yellow safelights.
2. Dry at room temperature for 3-4 hours.
3. Expose using a 365-nm (I-line) radiation.
4. Develop in hot water (60°C) for 10-20 min.
5. (Spin) Dry.

圖 3-1 是 Gelatin 溶於水後的顏色，濃度越高，顏色越深。

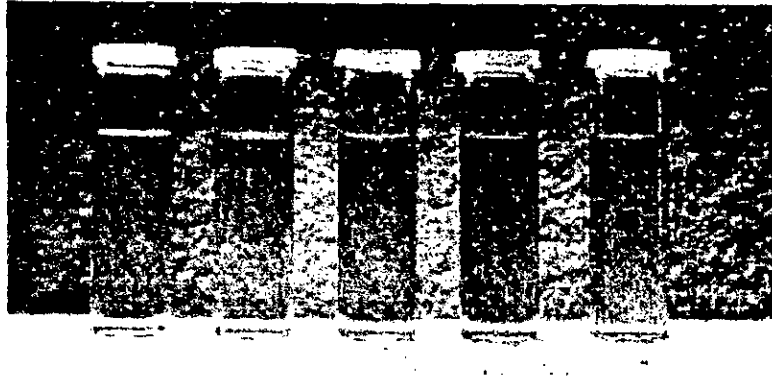


圖 3-1 溶於水後的 Gelatin。

四、嘗試製備 Gelatin 光阻

不過由於文獻中並無詳述如何將 Gelatin 塗佈到底板上，更遑論其厚度是多少，故筆者參照文獻所載配方，進行塗佈的試驗。因唯恐 Gelatin 溶液之黏性 (viscosity) 過高，造成厚度過鉅，不易顯影的結果，故將濃度減半：將 14g Gelatin 溶解於 50°C 300ml 的純水 (DI water) 中，冷卻至室溫，佈滿至表面已經有 HMDS 之矽晶片上，並以 4000rpm 轉速維持 40 秒鐘，得到近乎透明的淡藍色薄膜。

依照淡藍色氧化層只有 1000Å 左右厚度的經驗，筆者懷疑該旋敷之 Gelatin 薄膜厚度不高。於是將晶片先經過 18 小時之室溫凝固 (其實旋敷完畢時已經近乎凝固)，放入步進曝光機 (GCA stepper, UV light 波長 400nm) 中，以所謂 EXPO / array mode 的曝光測試程序，分別在同一片四吋晶圓之不同晶粒 (die) 上，測試 0.1-6.4 秒不等之曝光時間。曝光後泡入 50-60°C 的純水中顯影 30-40 秒，並以氮氣迅速吹乾，發覺具有光蝕刻 (photolithographic patterning) 的果效，不過留下來的 Gelatin 圖樣顏色又加深一些，判斷是因為該受 UV 光曝照區域之連鎖成聚合物之故 (Gelatin 是負光阻)。

以下圖 3-2~圖 3-4 是 Gelatin 光阻的顯微鏡放大圖像，可知其圖形解析能力已達微米之等級，比起一般光阻有過之而無不及。

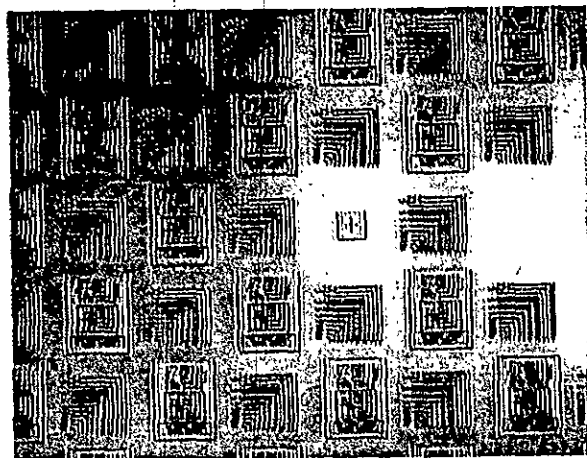


圖 3-2 放大 50 倍的 Gelatin 光阻圖形。光阻呈淡藍色，矽晶底板呈銀灰色。

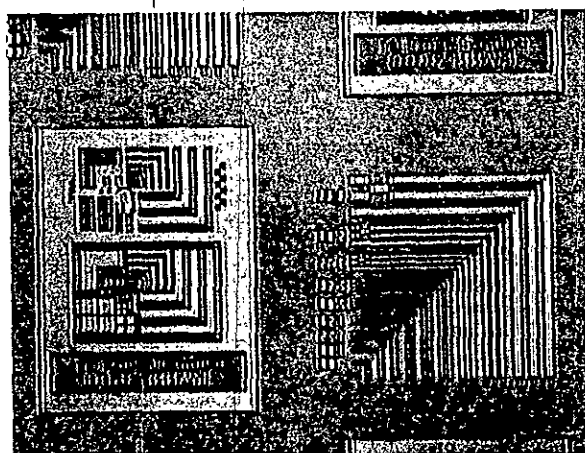


圖 3-3 放大 150 倍的 Gelatin 光阻圖形。數微米寬的直線圖像清楚。

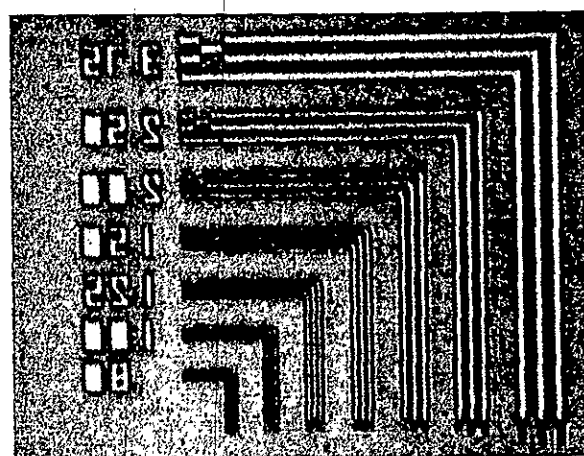


圖 3-4 放大 300 倍的 Gelatin 光阻圖形。線寬僅 1.00 微米的直線依然清晰可辨。

筆者以 Alpha step 量測顯影後 Gelatin 光阻之厚度，發覺只有 0.1-0.2 微米，與先前懷疑的厚度數量級幾乎一致。換言之，本種配方的 Gelatin 光阻因為厚度很薄，不需太長的曝光與顯影時間（須及時撈出水並快速吹乾，否則曝過光的區域還是會被水溶解），所以不及側向過切（undercut），而具有極佳之空間解析度。

五、Gelatin 的乾蝕刻特性

因為快速溶於熱水，所以即便能夠當作蝕刻之遮掩光阻（etching mask），可能也僅限於乾蝕刻（dry-etching）。故將上述已經顯影好 Gelatin 光阻的晶片，放入 PE-IIA 乾蝕刻機中，先試以 300W 之 SF_6/O_2 plasma 與純粹的 O_2 plasma，各進行 1 分鐘的蝕刻。前者的光阻大部分被去除，但同時留下很嚴重的殘留物，雖再使用 O_2 plasma 十分鐘，仍無法清除， 100°C 熱水亦無動於衷；後者則是將 Gelatin 光阻全然清除，沒有什麼殘留物。

所以若要當作蝕刻遮掩使用，Gelatin 必須夠厚（如數微米以上），而且一樣可以被光蝕成型，才有用處。否則只有配合 Parylene 薄膜或光阻結構層，當作犧牲層或保護層使用的功能。（稍後說明）

六、製備較厚的 Gelatin 光阻

欲製備比較厚的 Gelatin 光阻，降低轉速是一個方法，因為依照厚度 t 與其他製程參數的關係

$$t = \frac{\tau}{\rho r \omega^2} \quad (\text{直接由離心力與粘滯力的平衡推導而得})$$

其中 τ 是光阻與晶片之間旋數時的剪應力、 ρ 是光阻密度、 ω 是旋數之轉速；由上式知，降低轉速 ω 理論上可以二次方地增加光阻的厚度（事實上還是有些差距）。但是筆者試由轉速 4000rpm 降低到 2000rpm、1500rpm、1000rpm 的結果，發覺固然厚度隨轉速減慢而增加（GCA 曝光 3 秒，顯影 40~60 秒，光阻厚度分別為 0.05、0.08、0.12 微米），但是整個晶片卻有很明顯之輻射式花紋連帶氣泡！

原來 Gelatin 的凝固點（melting point）接近或低於室溫，許多滴在矽晶片上的 Gelatin 光阻，在尚未旋數均勻之前已經凝固（矽晶片熱傳導係數很低，幾乎隨時與室溫相同），連帶將不及塗佈均勻之膜厚與氣泡定型。圖 3-5 顯示凝固點隨濃度的變化：此地唯有降低濃度到 2% 以下，不管是 high boom value 或 low

boom value 材質的 Gelatin，其溶液之凝固點才有機會降低到 20°C 以下。換言之，先前調製的光阻 (14g Gelatin : 300ml DI water) 濃度是 4.5%，其凝固點仍然在 20°C 以上 (該光阻置放於無塵室中一小時，即全部凝固成如一塊果凍，未凝固前很像電影「異形」的粘不拉搭口水！) 並不適合直接用來當作旋敷的光阻液，除非每次應用前調製新的光阻，或提高無塵室內的溫度，或設法使旋敷時之矽晶片溫度保持在 Gelatin 凝固點之上。

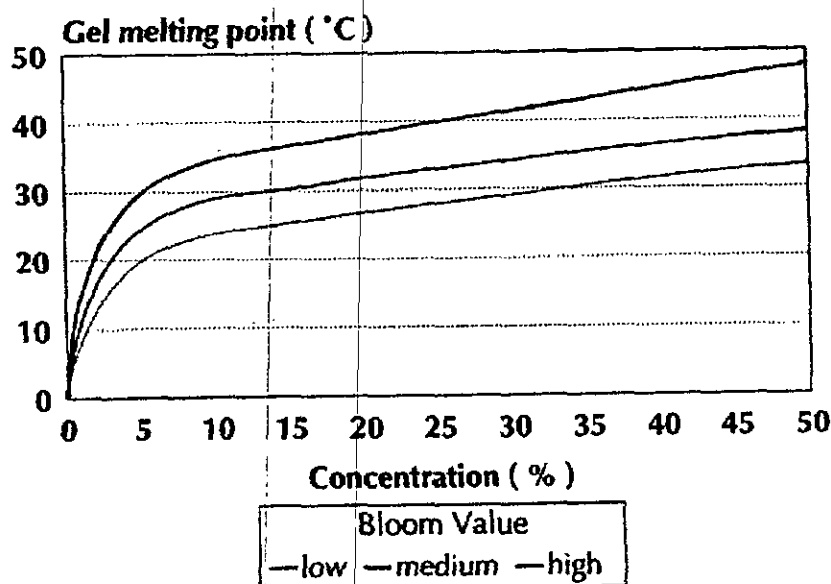


圖 3-5 Gelatin 凝固點隨濃度的變化

無塵室的溫度當然不能改變，所以除了每次調配新的光阻之外，另外如下之嘗試：(1)一直保持 Gelatin 光阻呈液體狀態：筆者試將濃度 32% 之 Gelatin 光阻保持於 60°C 的水浴環境之下一日之久，光阻雖然未凝固，但是顏色已經變深。之後進行塗敷，發覺黏性附著性與前一日均不同，且表面塗敷的平整度並不佳。(2)或將已經凝固的 Gelatin 光阻再予以加熱融化 (從資料看來可行，因為 Gelatin 是熱塑性 thermo-reversible 物質；但實際效果不確定)。

由於上述實驗無法提供至少 2 微米厚度等級的 Gelatin 光阻，故大大限制後續的應用。雖然依照圖 3-6 Gelatin 粘滯性 (viscosity) 對濃度的資料，知道在濃度 20% 以下，粘滯性沒有明顯的變化，所以旋敷後的光阻厚度，應該只單純地隨著轉速變化，與其他因素關聯不大；但事實上，很難以旋敷法製備 2 微米厚以上的均勻 Gelatin 光阻膜。

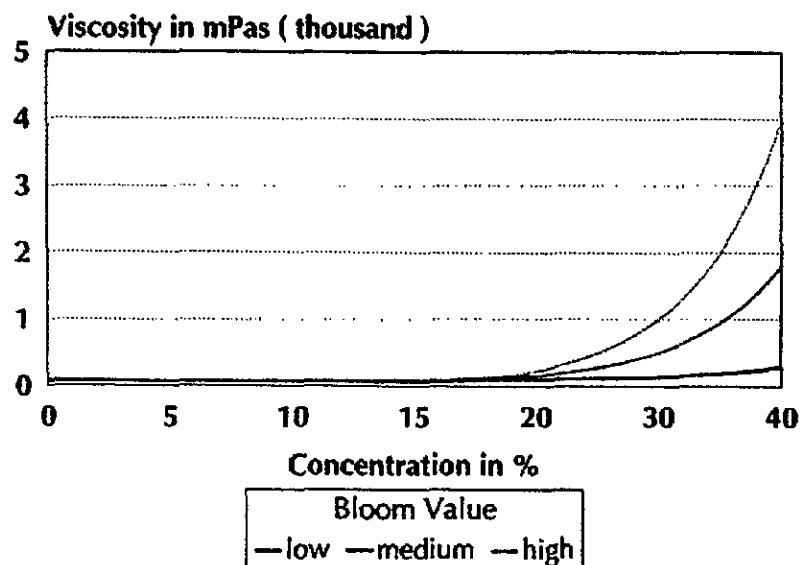


圖 3-6 Gelatin 粘滯度隨濃度的變化

由圖 3-6 另可知，提高濃度至 20% 以上，因為粘滯度提昇一個數量級，所以厚度可以大增。故筆者改調配 32% 的 Gelatin 光阻 (35g Gelatin: 75ml DI water: 3g $K_2Cr_2O_7$)，在 50~60°C 水浴環境下攪拌 1~2 小時，始完全溶解呈透明膏狀。一開始進行旋敷之時，因為沒注意到晶片溫度很低，所以光阻一倒在晶片之上便立即凝固，無法旋敷。後先將晶片與晶片旋轉吸盤一併放入烤箱中，升溫到 90°C，方爭取到一些時間進行 40 秒旋敷。轉速分別是 4000rpm 與 2000rpm。旋敷後光阻幾乎立即凝固，晶片邊緣還可看到甩出像棉花糖狀的細鬚。續以 GCA stepper 進行 2~5.5 秒之曝光，3~4 分鐘之顯影，發覺曝光 2.5 秒以上都有過度曝光的現象。轉速 4000rpm 之光阻厚度為 4.5 微米，而轉速 2000rpm 之光阻厚度為 6 微米。

七、Gelatin 在有機溶液與酸鹼中的特性

Gelatin 的故事結束了嗎？不！才剛剛敲鑼開講而已：Gelatin 在 Surface micromachining 有沒有用處，其實還不只是前述能不能塗敷得夠厚的問題。筆者先將前表中已經量過厚度的第 5、6 樣品，繼續嘗試泡於有機溶液中（雖然對樣品而言是發揮剩餘價值，但是測試的結果很有價值：）發覺 Gelatin film 不溶於 Acetone！（筆者將再後面敘述這個特性的優點與用途）至於酸鹼要看是什麼種類，因為 Gelatin 是膠原蛋白（本身微酸性），所以強酸、強鹼（如顯影液）都不用題了，絕對完蛋！但是其他就不一定了。

筆者恰巧從文獻中找到一篇談 Gelatin 的文章, J.C. Angus, et al., "Controlled electroplating through Gelatin films", J. Electrochem. Soc., v. 133, n. 6, pp.1152-1160 (1986), 裡面提到用 Gelatin 作為電鍍時控制厚度變化的障礙層, 既然能暴露於電鍍液中, 當然不怕電鍍液, 請問該電鍍液為何? 就是 1M 的硫酸銅電解液。

不過 Gelatin 基本上還是對酸鹼度相當敏感, 因為本身是微酸性的緣故, 所以在酸性溶液中的抵抗力較佳, 但是遇到強酸, 還是會被溶解, 否則我們的胃液 (含大量 HCl) 如何消化得了蛋白質?

至於在鹼液之中, 尤其是顯影液之中, 立刻會被摧毀。下面幾張圖形即代表顯影液 (AZ400K: DI water=1:4), 在進行顯影 Gelatin 之上的 AZ4620 光阻之後, 繼續快速腐蝕 Gelatin 的情形。Gelatin 在強鹼液中, 會從最脆弱的點部位, 像火山爆發般先炸開幾個洞口 (圖 3-7 的上方三個像開花般的多邊形洞口), 然後迅速使 Gelatin 與底板脫層, 並將 Gelatin 趨向 gel 般的溶糊狀; pH 值越高, 溶糊的情況越嚴重 (圖 3-8), 最後連遮蔽用的光阻下方 Gelatin 也難以倖免, 全部溶散、所剩無多 (圖 3-9)。

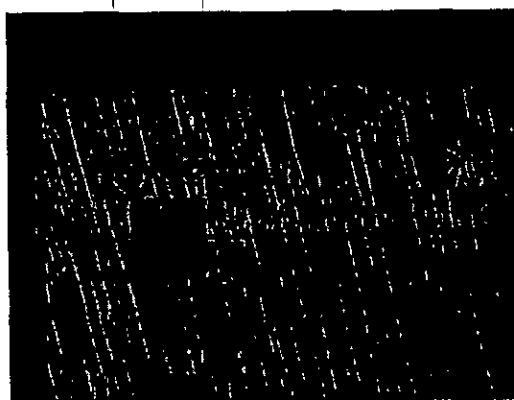


圖 3-7 顯影液 (AZ400K: DI water=1:4) 剛開始腐蝕 Gelatin 之情形。



圖 3-8 顯影液 (AZ400K : DI water=1 : 4)進一步腐蝕 Gelatin 之情形。

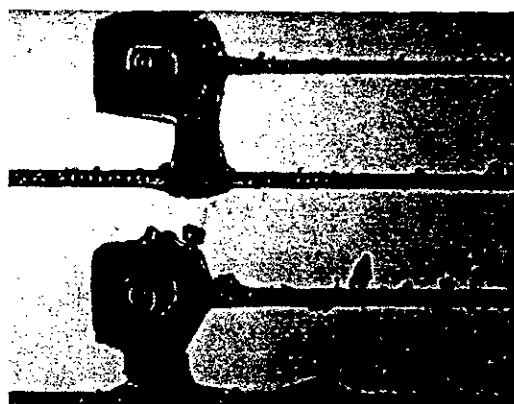


圖 3-9 顯影液 (AZ400K : DI water=1 : 4)腐蝕完 Gelatin 之情形。

另外筆者也嘗試把 Gelatin 放入 30%的雙氧水之中，在 20 分鐘之內，觀察不到腐蝕的現象，不過表面已經開始出現大量皺折與氣泡的外觀，如圖 3-10：



圖 3-10 雙氧水(30%)腐蝕 Gelatin 之情形。

八、Gelatin 的腫脹效應

不僅如此，吾人進一步將 Gelatin film 直接浸入冷水中測試：厚度薄、圖案細的部分可以支撐一陣子（幾分鐘）；而較厚、圖案粗的部分則較容易與矽晶片脫層（de-lamination）。雖然脫層，浮在水中，並不是立刻溶解掉，而是在幾秒鐘之內先作一個大幅度體積變化的「腫脹」（huge swelling）；用肉眼便能清晰分辨出圖案面積至少因為腫脹增大一倍，相當叫人吃驚。

本腫脹效應，未來或可以有致動的效果；但是對於 Gelatin 光阻在水中顯影則有直接明顯的壞處：

第一、微結構圖形尺寸在顯影之後有很大的體積變化——即使 Gelatin 薄膜仍然與底材粘著良好，也是照樣變形。對於細線寬的長條圖形，不僅變形，還會造成蜿蜒彎曲的情形（如圖 3-11 所示，10 微米寬 2 微米厚的細線已經變形扭曲）。

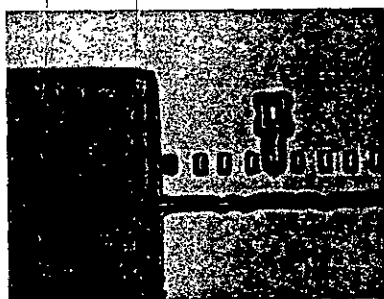


圖 3-11 細線寬的 Gelatin 長條圖形，不僅變形，還會造成蜿蜒彎曲的情形

第二、Gelatin 光阻有其特殊的設計限制條件（design rule）；兩個圖形不能靠得太近，否則會因為腫脹關係擠在一起，造成圖形邊界模糊不清（比較薄，厚度在 0.2 微米左右的邊緣模糊部分，可以用 O_2 電漿去除。）

第三、顯影後光阻圖形在大氣中會逐漸乾燥收縮，不過是否收縮回原來的尺寸，或者與顯影前之圖形尺寸相差多少，都很難界定，而必須依賴實驗一一校正。

當然這都是 Gelatin 厚度超過 2 微米後，才會發生的情形。而且均與 Gelatin 本身吸收水分有關，所以在熱水顯影之後，必須加上浸泡乙醇或異丙醇(IPA)的脫水程序（類似負片沖洗之定影功能—fixer），使 Gelatin 腫脹的效果，降到最低。

九、Gelatin 如何應用於面型微細加工 (Gelatin as a new material in surface micromachining)

Gelatin 溶於熱水，卻不溶於丙酮的特性，恰與一般光阻溶於丙酮，不溶於熱水的特性互補，加上 Gelatin 與光阻的薄膜製備溫度都很低，所以彼此可以當作面型微細加工之互補性材料。換言之，在概念上可以將 Gelatin 當作犧牲層，光阻當作結構層，用熱水溶除 Gelatin，得到光阻的微結構；同理也可以將光阻當犧牲層，Gelatin 當作結構層，用丙酮溶除光阻，得到 Gelatin 的微結構。

不過因為 Gelatin 材料過於柔軟 (Young's 模數 E 小於 MPa)，不宜當作結構層；即使當作通道壁，除非極為厚實，仍然極易與底材接觸粘死。

另外，光阻質脆，若當作結構層，厚度也不能太薄，但是太厚又有塗敷後 (室溫) 乾燥時裂開的顧慮，以及之後厚光阻顯影曝光的問題。所以筆者試行成長 Caltech 此地的低溫 Parylene 薄膜 (E 約為 4~5 GPa) 於 Gelatin 犧牲層之上作為結構層，先測試微管道中，Gelatin 犧牲層在熱水中的溶除可行性與其速率，並探討溶除 Gelatin 之後的微管道內壁，是否較為偏向親水性，或者殘留渣滓較少，有利管道製作之後的充填應用。

底下筆者設計一套光罩，進行「Gelatin—光阻」與「Gelatin—Parylene」面型加工法之開發。也就是將 Gelatin 當作犧牲層，光阻或 Parylene 當作結構層的光罩設計：

本套光罩之下半圖是 Gelatin 用犧牲層光罩，因為 Gelatin 是負光阻，所以露空部位的 Gelatin 將都留下來。圖 3-12 是 Parylene 或光阻結構層的開洞用光罩，露空的部位都將蝕除。光罩中共有三種圖案：

- (1) 上方條狀圖案為微細流道，長度均為 5mm，寬度自 10 微米到 100 微米，每增加 10 微米寬度增畫一條流道。流道兩端是進出口。
- (2) 下半方塊圖案是準備架高光阻懸臂樑結構的 Gelatin 犧牲層，其中的 5 微米見方或 10 微米見方的點狀圖案，是所謂 dimple 或 post，每 50 微米畫一個，用來在 Gelatin 犧牲層上預先挖出 5 微米見方或 10 微米見方的小洞，稍後塗佈光阻結構層時，光阻可以填塞這些小洞。等到以熱水溶除 Gelatin 犧牲層後，預先填塞小洞的光阻形成每隔 50 微米的微小支撐柱狀物，能夠預防光阻懸臂樑結構因為

水的表面張力效應(surface stiction)而粘在基板之上。(或言該 5 微米見方或 10 微米見方的柱狀物不是直接粘在基板之上嗎？還不是粘住基板？其解釋是：至少只是”點接觸”，而不是因為 surface stiction，致使整個微結構”面接觸”式地塌陷下來！)事實上，在較寬的微細流道之中，也預先留下類似的點狀圖案，避免流道中央塌陷下來。

- (3) 左下角圖案則是具有雙連接樑的微小控制翼面(flap)結構，其用以測試的功能與懸臂樑類似。

至於製程順序如下：

1. 在黃光室內調製 Gelatin 光阻。
2. 加溫式塗敷 Gelatin 光阻薄膜於晶片之上，黃光室內乾燥 3~4 小時。
3. 運用犧牲層光罩，對 Gelatin 曝光顯影，並以 50~60 度 C 熱水進行顯影，浸泡入 IPA/純水或酒精/純水(50%:50%)30~60 秒對已交聯之 Gelatin 進行適度的脫水。室溫乾燥 24 小時。
4. 由於 Gelatin 自水中吹乾後，圖形邊緣總會多少殘餘薄薄的低濃度 Gelatin(顯微鏡下呈淡藍色)，必須

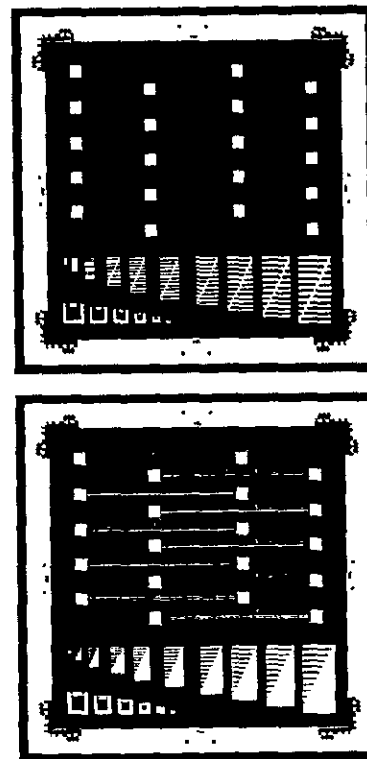


圖 3-12 Gelatin 面型加工用試驗光罩

用 O₂ 電漿才能進行清除(descum)。

5. 若是以光阻為結構層，塗佈之後室溫乾燥至少 24 小時，直接用結構層光罩曝光、顯影、晶片切割。若是以 Parylene 為結構層，需先塗佈 A174 粘著增強膜(adhesion promoter)。配方是 A174:IPA:DI=5g:500ml:500ml，混勻後等待 3 小時。晶片泡入上述溶液 15~30 分鐘，晾乾 15 分鐘，然後泡入 IPA 中 30 秒，吹乾備便。
6. 成長 Parylene-C 某一厚度(2~3 微米)。
7. 在 Parylene-C 上塗佈他種光阻，黃光室中室溫乾燥 24 小時，然後再用結構層光罩曝光、顯影。
8. 以 O₂ 電漿對 Parylene 進行開洞。最後再塗上另一層光阻，室溫乾燥後晶片切割。

上述製程中，成長 Parylene 前的 A174 處理，對於 Gelatin 薄膜的厚度影響有限，表 3-1 是不同線寬的 Gelatin 犧牲層薄膜厚度，在浸泡過 A174 前後的變化：

表 3-1 不同線寬的 Gelatin 犧牲層薄膜厚度，在浸泡過 A174 前後的變化

Gelatin 線寬(微米)	泡 A174 前之厚度(微米)	泡 A174 後之厚度(微米)
10	0.81	0.96
20	1.06	1.04
30	1.20	1.19
40	1.44	1.49
50	1.64	1.53
60	1.73	1.67
70	1.90	1.80
80	1.93	1.82
90	2.02	1.88
100	2.21	1.81

雖然主要圖形未遭 A174 有機溶液的破壞，不過因為含水，所以較細小的圖形(尺寸 10 微米以內)，還是有扭曲甚至移位的現象。

塗佈的意外插曲 (episode)

第二次調製高濃度 Gelatin 厚光阻：重量百分比 32%，旋數轉速 2000rpm，歷時 60sec。因為 Gelatin 顆粒溶解於水時之溫度太高(攝氏 60~70 度)，加熱時間也放太久(3.5 小時)，結果在黃光下變質成深琥珀色。更糟糕的是，一塗佈到晶片乾掉之後，很快從邊緣掀開翹起(即使硬要將未翹起的部位曝光顯影，光阻圖形的顯影結果也很差)。所以品質不佳的 Gelatin 不易與矽晶片粘著良好。至於 Gelatin 與一般光阻因為粘著良好，本來應該沒有問題，反而原先矽晶上的光阻圖形，也意外地被翹起的 Gelatin 一併拉開脫層！所以簡單的概念與製程，操作起來卻也不那麼單純。

繼續重複一次調製，重量百分比 32%，溫度控制在攝氏 50 度以下，旋數乾掉的結果還是邊緣翹起！筆者翻閱以往類似製程為何沒有類似問題，方發覺以往是塗佈在具有氧化層的矽晶片表面，所以沒事；而此次用的是純粹的矽晶，所以粘著性不佳。

由於一時不知用何種粘著加強劑 (adhesive promoter) 才合適 Gelatin 在矽晶上之附著，只好繼續嘗試較低濃度的 Gelatin，塗佈在已經有 HMDS 的純粹矽晶之上。筆者將已經用掉剩下 100cc 的 32% Gelatin 加水 60cc，重量百分濃度降為約 20%。旋數轉速 2000rpm，歷時 40sec，這回便沒有立即乾掉後邊緣翹起的現象，塗佈之表面花花的顏色類似正光阻 AZ4400 (轉速 4000rpm，歷時 40sec，軟烤後厚度只有 3.5 微米)。為了增加厚度，稍事軟烤 3 分鐘後，再重複一次相同條件的塗佈：花花的表面顏色變深。故趁機也將已經具有 AZ4620 光阻圖形的晶片，援例連續塗佈兩次 20% 的 Gelatin 光阻；邊緣也沒有翹起的現象。但是因為 Gelatin 光阻沒有經過過濾的步驟(唯恐在過濾過程中乾掉)，所以許多 10~20 微米的小氣泡充斥在其中，猶待解決。

前述塗佈後的 Gelatin 光阻膜，經過一天的陰乾，以波長 400nm 的 UV 光曝光 2.8 秒，55 度 C 熱水顯影 4 分鐘，發覺 10 微米以上的線寬可以顯影清楚。不過膜厚不甚理想：塗佈二次的樣片只有 1.2~1.65 微米，塗佈一次的樣片更只有 0.8~1.25 微米(不過經過一週處於相對溼度 30~40% 的大氣環境中，交聯過

的 Gelatin 薄膜又吸收水氣，厚度分別增加到 2.0~2.6 微米、1.6~2.2 微米的範圍)。看來 Gelatin 光阻的確不容易製備。另一種成型的方式 (不見得比較單純，參見後面的章節)，或可直接塗佈不摻 $K_2Cr_2O_7$ 的純粹 Gelatin 厚膜，然後再塗佈一道其他的光阻遮掩，光阻光蝕微影後，另嘗試以電漿乾蝕刻法或甚至濕蝕刻法成型定義之。圖 3-13 是 10 微米線寬的 Gelatin 實際外貌。

茲將已經操作之試驗整理如表 3-2。

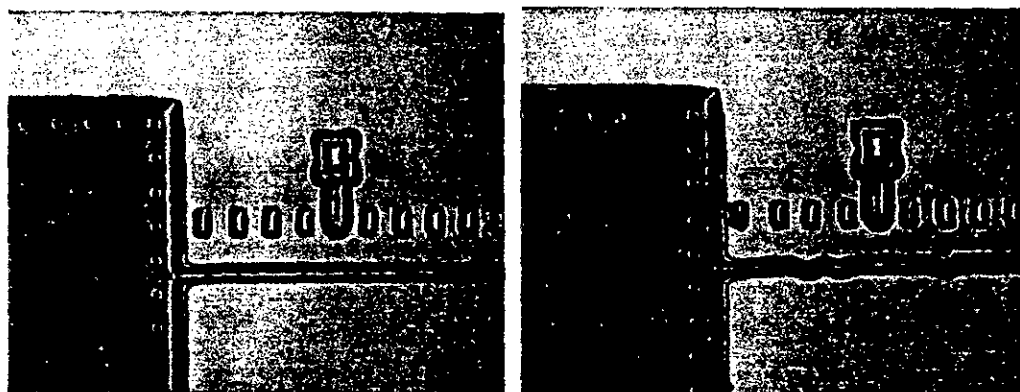


圖 3-13 10 微米線寬的 Gelatin 實際外貌。左側厚度 2.2 微米，右側 2.6 微米。

表 3-2 曾嘗試過的 Gelatin 製作參數。

Sample no.	Concentration (%)	Speed (rpm)	Exposure (sec)	Develop (min)	Thickness (um)
1	4.5	4000	0.1~6.4 (3.0)	0.7	0.1~0.15
2	4.5	2000	3	0.5	0.05~0.08
3	4.5	1500	3	0.5	0.08
4	4.5	1000	3 (Bad)	0.7	0.1~0.15
5	32	4000	0.5~4.0 (1.0)	4	4.5
6	32	2000	2.0~5.5 (2.0)	3.5	6~7
10	20×1	2000	1.0~2.8 (2.7)	4.0	0.8~1.53
7	20×2	2000	2.8	6.0	1.25~1.65

至於 Gelatin 光阻與矽晶粘著不佳的問題，經查明以往相關論文所述

Gelatin 光阻所在基板，以玻璃居多，故前述矽晶片若成長氧化層之後再行塗佈，或是乾脆改成玻璃基板，都可以解決附著性不佳的問題。(後記：即使在冷水中顯影達一小時，已經交聯的 Gelatin 還不會溶解消失於水中，換言之，要當作犧牲層的 Gelatin 光阻，不能直接用冷水溶除；熱水雖然溶除得了，但在蝕刻完成之前，通常 Gelatin 已經與基板脫離。或可必須改用蛋白質酵素或鹼液；前者名為 Proteinase-K，該配方得自文獻 Ultramicroscopy, 74(1998), pp.75-81，不過價格太貴，100mg 索價 70 美金，不適於犧牲層去除時之大量使用。後者如前一節 Gelatin 在鹼液中之反應所述。)

十、未交聯 Gelatin 的乾蝕刻特性：

本小節試圖利用光阻作阻擋，測試 Gelatin 薄膜在電漿中被蝕刻的效果。程序是先塗佈 Gelatin，接著進行一般光阻塗佈製程，然後乾蝕刻：

1. 只要小心旋敷，32%的 Gelatin 還是可以直接塗佈在矽晶片上。旋轉速度 2000rpm，40 秒。置於室溫中自然乾燥 (絕不可加溫烤乾，加溫會立即使晶片邊緣的 Gelatin 脫層翹捲)，歷時至少一日。膜厚約為 10-13 微米。
2. 旋轉塗佈 AZ-4620 光阻。旋轉速度 2000rpm，60 秒。為了避免 Gelatin 脫層翹捲，一樣將光阻置於黃光室的室溫中 (或將晶片盒用鋁箔包裹外殼，避免曝光) 自然乾燥，至少一天。
3. AZ-4620 在步進機中曝光 1.5 秒，顯影液是 AZ-400K：純水=4：1，顯影時間 1 分 10 秒。上述顯影時間比完全顯影時間為短，一則因為此地光阻未經過軟烤 (soft-baking, 100 度 C, 20 分鐘；標準顯影時間約為 3-4 分鐘)，二則因為 Gelatin 在鹼液中立刻會被摧毀，所以要留下一些顯影區光阻的厚度，保護底下的 Gelatin。圖 3-14 是以 alpha-step 量測 Gelatin 上顯影光阻的厚度剖面，底層 Gelatin 約厚 12 微米，光阻厚度 8-9 微米。

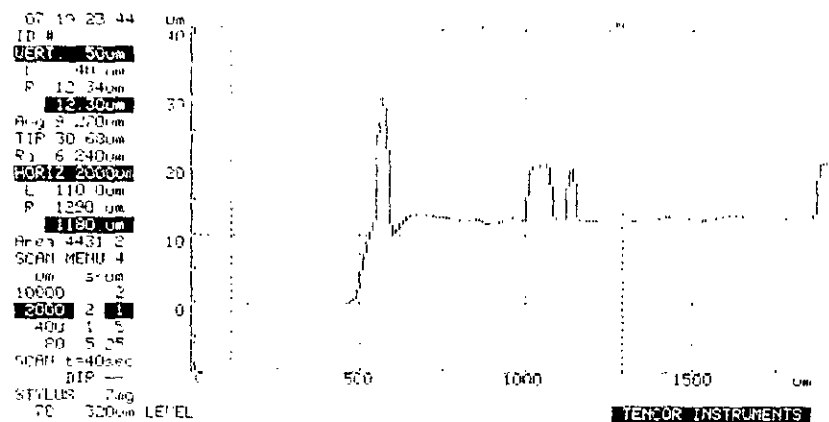


圖 3-14 以 alpha-step 量測 Gelatin 上顯影光阻的厚度剖面，底層的 Gelatin 厚度約 12 微米，而上方之光阻厚度為 8-9 微米

4. 利用 PE-IIA 乾蝕刻機，先進行 AZ-4620 光阻開洞的動作，以便露出 Gelatin。製程條件是 400W/RF power 的 O_2 電漿，在 400mtorr 真空環境下，蝕刻 2~4 分鐘。

5. 接著才開始 Gelatin 乾蝕刻的步驟。筆者試過兩種配方：

(1) 繼續以前述 O_2 電漿之條件腐蝕 Gelatin (事實上對 Gelatin 表面進行燒除的動作)，每作完乾蝕刻 2 分鐘，破真空取出晶片量測厚度，以免 AZ-4620 光阻率先被燒除，無法障蔽保護底下的 Gelatin 圖案。不過量測出來的腐蝕率極低，只不到 0.2 微米/每分鐘。更糟糕的是，Gelatin 表面經過 6 分鐘的蝕刻後，普遍性出現龜裂的現象，連帶也波及到光阻圖案，如圖 3-15。故嘗試失敗。



圖 3-15 Gelatin 表面經過 O_2 電漿蝕刻後，普遍性出現龜裂的現象

(2) 改以 $\text{SF}_6 : \text{O}_2 = 300\text{mtorr} : 30\text{mtorr}$ ，RF/400W 的電漿，腐蝕 Gelatin 表面。腐蝕率略高於 O_2 電漿，但是要蝕深 10 微米，預計需時達 50 分鐘。事實上在 15 分鐘後，Gelatin 表面也普遍性出現龜裂的現象，連帶波及到光阻圖案，如圖 3-16 (a)~(d)。本嘗試亦失敗。

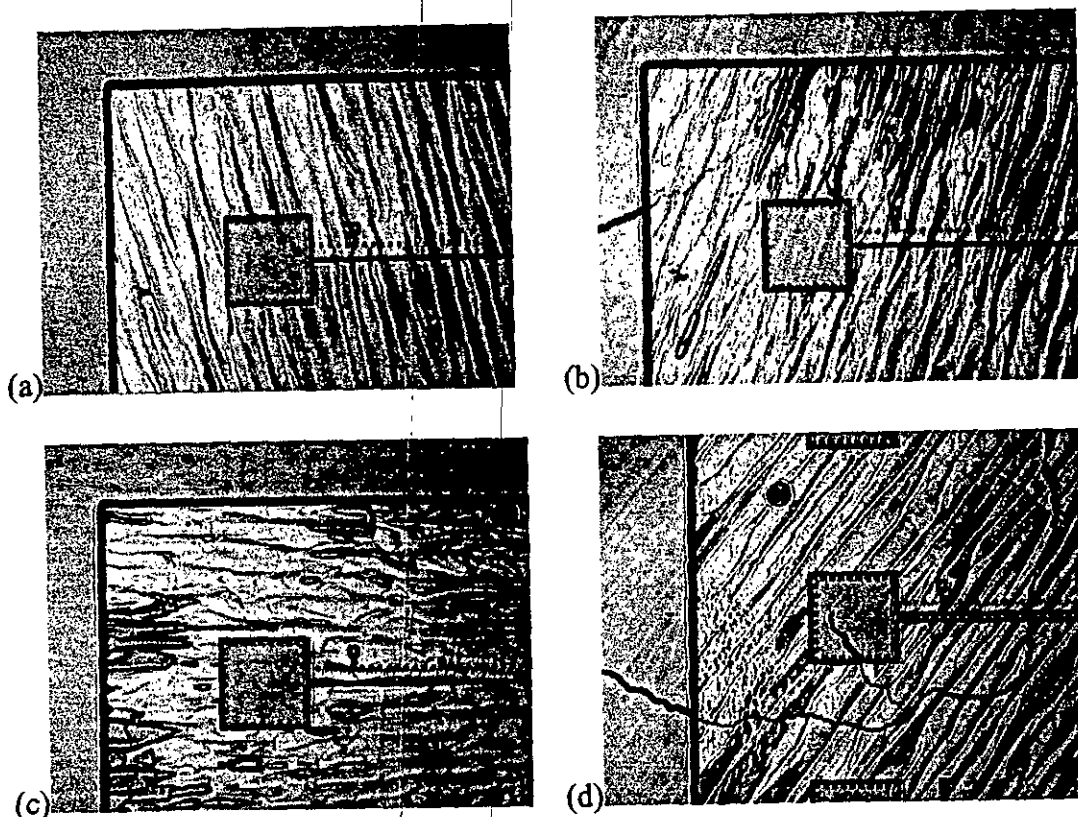


圖 3-16 Gelatin 表面經過 SF_6 電漿蝕刻後，也出現龜裂的現象

結論：Gelatin 在電漿中不易被腐蝕，所以一般光阻阻擋成型的加工方式不易成功（必須注意水分蒸乾到 10% 以下之 Gelatin 龜裂粉碎的問題）。倒是可當作其他材料的乾蝕刻 etching mask，不過要注意長時間乾蝕刻後表面龜裂的問題。

下一節起，筆者仍要回到一開始的 Gelatin 光阻製程，希望藉著以往文獻的協助，以及已經有的嘗試錯誤經驗，改良製程，希望將原先只有線寬解析度 20 微米、厚度 2 微米的 Gelatin 圖案，儘量提升到線寬解析度 10 微米、厚度 5~10 微米的程度。

十一、其他文獻上的有關 Gelatin 製備

對於 10 微米寬，若是只有 2 微米厚度的細線圖形，如圖 3-17(a)，外型尚稱完整，邊緣有側斜現象，不過仍可接受。但是 5 微米厚的細線圖形，如圖 3-17(b)，便呈現蜿蜒彎曲的現象，而且側斜現象比較不嚴重（黑影寬度較窄），倒是有側切現象 (undercut)，經判斷是因為 Gelatin 太厚，表面在接受曝光之後，顏色轉為深褐色（肉眼可見），妨礙接近晶片的底部 Gelatin 繼續接受曝光，以至於劑量與交聯 (cross-linking) 不足，比較容易被熱水顯影溶除；這也是為什麼細線部分蜿蜒彎曲的原因，因為細線 Gelatin 的底部已經近乎與晶片脫層。

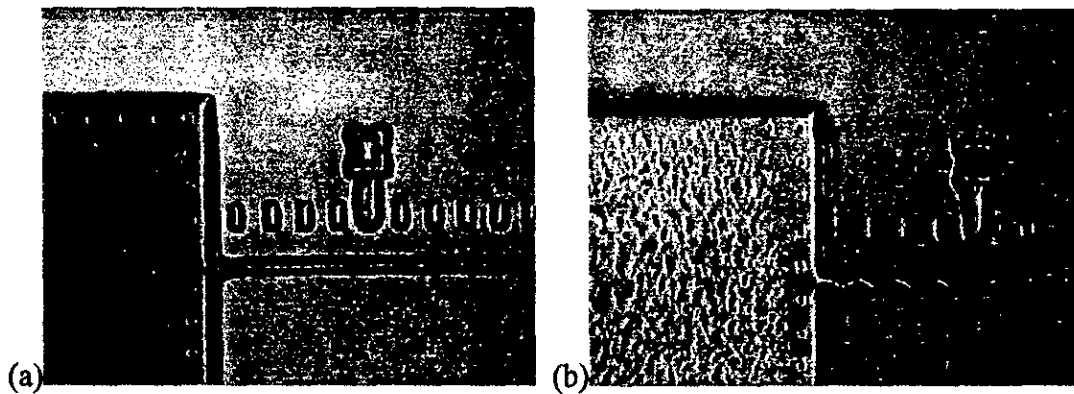


圖 3-17 10 微米寬，2 微米厚度的 Gelatin 細線圖形

十二、本章結論

筆者在明膠方面的初步研究，尤其在面型加工犧牲層方面的嘗試，尚未成功；相對而言，卻藉由多方的蝕刻嘗試，了解明膠在曝光交聯後的機械與化學性質。初步的結論是，交聯後的明膠不易溶解於各式酸鹼與有機溶液，換言之，其對於外界環境之抵抗能力極佳，可以當作蝕刻保護膜。加上其能夠光刻成型，又容易以濃度控制塗佈後的厚度，彌補 Young's 模數不大的缺點，所以可作為其他面型加工結構(如高分子結構)的補強材料。應用的摘要請參見附錄 I。

派赴美國加州理工學院研習微機電技術結案報告

第四章「毛細液面前緣流速的探討」

研習期間：89 年 08 月 25 日至 90 年 08 月 24 日

計畫編號：NSC-89-2217-E-032-001

報告人：楊龍杰 淡江大學機械工程學系

E-mail: Ljyang@mail.tku.edu.tw

一、毛細 (capillary) 現象

毛細現象約在二百年前，便已經被一些歐洲的學者討論過。不過因為受限於實驗設備與毛細管路製作的精密程度，並沒有作進一步的探討。這個課題算是古典力學中，少數與微小尺寸相關的課題。

筆者在加州理工學院研習過程中，與微管路的課題或具有微管路的晶片接觸頻繁，加上此地已經有現成的顯微鏡攝影設備，故試圖在此方面的研究有個起頭，並希望在返國後繼續從事相關之微熱流技術研究。

二、表面張力 (surface tension)

液體的表面張力與毛細現象息息相關。該張力讓液體表面像是可收縮自如的橡皮鞘 (elastic sheath)，而儘可能使液體的表面積縮小，而達到整體最低也是最穩定的位能態。表面張力的單位是每單位長度的力，所以乘上沾濕面積 (wet area)，就是所謂的「表面能」 (surface energy)。

三、楊氏定律 (Young's law)

通常在這個課題第一個要介紹的定律，叫做「楊氏定律」。

假設固體平面上有一水滴或水漬的前緣，在該液、氣、固介面所在，有三種作用力互動，如圖 4-1 所示，有液體與空氣間的表面張力 γ_{la} 、液體與固體間

的表面張力 γ_{sl} 、以及固體與空氣間的表面張力 γ_{sa} 。三作用力在介面點水平方向之力平衡關係如下：

$$\gamma_{sa} = \gamma_{sl} + \gamma_{la} \cos \theta_c \quad (1)$$

θ_c 是接觸角 (contact angle)。接觸角小於 90 度，液體極易吸入毛細管內。稍後會應用此公式於毛細管內作用力的推導。

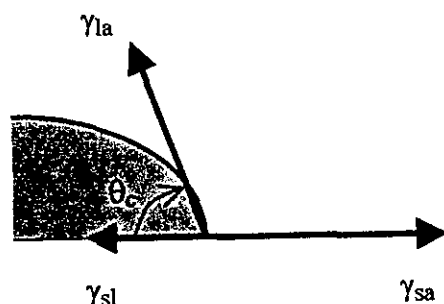


圖 4-1 固體平面水滴的液、氣、固介面

四、兩平板間液體的毛細現象與表面能

計算表面能的目的，在於只需將其對空間變數一次微分，便可得知毛細現象中的在該空間變數方向的作用力淨值。誠如先前所提，表面能是由表面張力乘上沾濕面積，而且三種非同物質相的表面張力都要計算，所以毛細管內所有表面積的表面能，都要加在一起，以便我們最終計算毛細管中液體的所受作用力，以及其被吸引進入管道內之速度 (Mastrangelo C. H. and Hsu C. H., 1993, Mechanical stability and adhesion of microstructures under capillary forces- part I: basic theory, J. MEMS, 2, 33-43。)(Niels Tas, et al., Stiction in surface micromachining, J. Micromech. Microeng., 6(1996), 385-397。)

圖 4-2 是兩平板間液體的毛細現象，毛細管呈矩形，寬度間隙為 g ，垂直紙面的深度是 h ，毛細管全長 L ；所以圖中的總沾濕面積 $A_T = 2L(h+g)$ (包含四個平面)，部份沾濕面積 $A_x = 2x(h+g)$ ，四個平面的接觸角先假設完全相同。假設圖 4-2 的左邊，也就是毛細管的進口，是接到遠

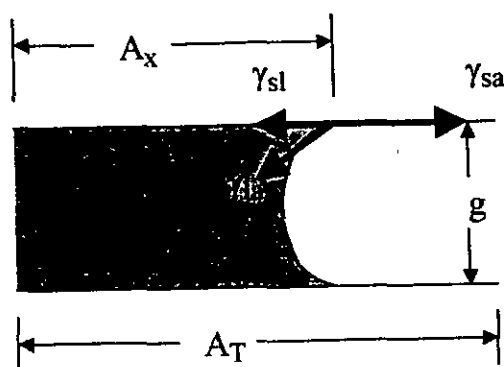


圖 4-2 是兩平板間液體的毛細現象

大於毛細管體積的固定儲液槽 (reservoir)，所以可視為已經具有固定不變的表面能 E_0 。

另外一般所謂毛細管，其管徑都遠小於管長 100 倍以上，所以毛細曲面 (meniscus) 的面積，與整體表面積比較起來微不足道，此地暫時忽略其 (曲面面積乘上 γ_{la}) 對表面能的貢獻。

所以毛細管的總表面能，除了 E_0 外，還包括兩部份：一部份是沾濕面積 A_x 的 γ_{sl} 作用，另一部份是總面積 A_T 扣掉沾濕面積 A_x 的 γ_{sa} 作用，總和如下：

$$E_s = E_0 + [A_x \cdot \gamma_{sl} + (A_T - A_x) \cdot \gamma_{sa}] \quad (2)$$

合併同類項

$$E_s = E_0 + [A_T \cdot \gamma_{sa} + A_x \cdot (\gamma_{sl} - \gamma_{sa})] \quad (3)$$

將楊氏定律帶入(3)式之小括號中，得到

$$E_s = E_0 + [A_T \cdot \gamma_{sa} - A_x \cdot \gamma_{la} \cdot \cos\theta_c] \quad (4)$$

五、毛細現象的作用力

繼續將 $A_T=2L(h+g)$ 與 $A_x=2x(h+g)$ 帶入(4)式之表面能

$$E_s = E_0 + 2(h+g) \cdot [L \cdot \gamma_{sa} - x \cdot \gamma_{la} \cdot \cos\theta_c] \quad (5)$$

我們可以發覺空間變數 x ，已經出現在表面能的表示式(5)中。所以此地直接對 x 微分，並乘上負號，當作毛細管中 x 方向的受力

$$F = -\frac{dE_s}{dx} = 2(h+g) \cdot \gamma_{la} \cdot \cos\theta_c \quad (6)$$

(6) 式的作用力 F 便是毛細管右端的液氣面壓力差 (Δp_{la}) 乘上毛細管截面積 ($g \cdot h$)，其關係如下

$$F = 2(h+g) \cdot \gamma_{la} \cdot \cos\theta_c = \Delta p_{la} \cdot (g \cdot h) \quad (7)$$

所以矩形截面毛細管右端的液氣面壓力差可表示為

$$\Delta p_{la} = \frac{2(h+g) \cdot \gamma_{la} \cdot \cos\theta_c}{g \cdot h} \approx \frac{2\gamma_{la} \cdot \cos\theta_c}{h}; (g \gg h) \quad (8)$$

(8)式顯示：毛細管截面尺寸 g 或 h 越小，壓力差越大！而接觸角 θ_c 的大小是量測毛細作用力的一重要訊息。若假設毛細管截面改為圓形，則利用水利直徑 (hydraulic diameter, 水利半徑 r_h ——就是毛細圓管的半徑) 的定義

$$D_h = 2r_h = \frac{4A}{P} = \frac{2gh}{(g+h)} \quad (9)$$

(8)式變成

$$\Delta p_{la} = \frac{2\gamma_{la} \cdot \cos\theta_c}{r_h} \quad (10)$$

使液氣曲面也假設呈圓弧狀，則接觸角 θ_c 與毛細圓管 r_h 、曲率半徑 r 的幾何關係如下：

$$r_h = r \cos\theta_c \quad (11)$$

所以毛細管右端的液氣面壓力差可進一步表示為

$$\Delta p_{la} = \frac{2\gamma_{la}}{r} \quad (12)$$

(12) 式就是所謂的 Laplace 方程式，與(8)式代表相同的物理意義。以曲率半徑 10 微米的毛細管為例，其壓差約為 0.01MPa，或是 0.1 大氣壓！(Israelachvile J N, 1992, Intermolecular and Surface Forces, London: Academic 或 Madou 教科書 p.433。)

另外要補述的是，此地暫時沒有考慮到其他作用力或效應對表面能的貢獻，例如：有機溶液中的 van der Waals force、水溶液中的 double-layer effect，以及溼氣 (moisture) 或溫度的效應。(P.G. de Gennes, Wetting: statics and dynamics, Reviews of Modern Physics, 57(3-I), 1985.)

六、毛細現象的前進模式

討論毛細管的壓差，除了代表毛細液面會前進之外，另要注意上下兩個液、固、氣介面的接觸角不見得一致；事實上該毛細充填吸入的動作是一前一後的，也就是先有一側前進，該側的接觸角變小，然後等接觸角大的另一側跟上來。

我們利用圖 4-3，定性解釋一前一後的液面前進模式。定義上介面接觸角為 θ_{c1} ，上介面接觸角為 θ_{c2} ，假設扭曲不對稱的毛細液面大體的位置在 x ，忽略前後接觸點的距離差。並假設以對稱中線為準，將整體液氣面壓力差分為上半部壓力差 Δp_{upper} 與下半部壓力差 Δp_{lower} ，依據(12)式，滿足下式關係

$$\Delta p_{lower} = \frac{2\gamma_{ls}}{r_{long}} < \frac{2\gamma_{ls}}{r_{short}} = \Delta p_{upper} \text{ (接觸角大，曲率半徑跟著縮小)} \quad (13)$$

所以上半部的局部壓力比下半部壓力為大，促使圖 4-3 落後的上半部液面，趕緊跟上來！又因為小尺寸下，前進是斷續性的，落後液面追上來時，會有過頭的情形，所以上下液面便反覆扮演交替領先或落後的角色。圖 4-4 便是毛細液面 (g

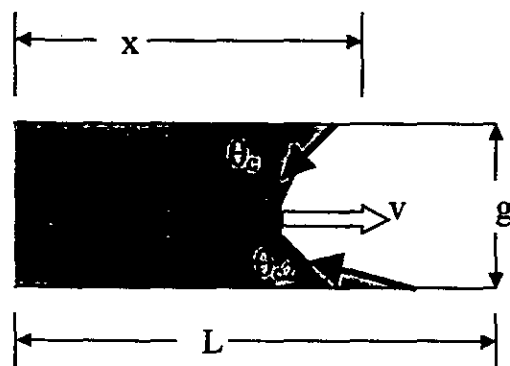


圖 4-3 一前一後的液面前進模式

為 60 微米，h 為 3 微米，上方與兩

側管壁為 Parylene 材質，底部為金電極，不具有親水性，表面能較低，故移動較為遲緩) 前進的三個鏡頭：



圖 4-4 毛細液面前進的三個鏡頭

以下我們把矩形毛細管四個壁面的接觸角廣義成四個不同的接觸角，並分

別定義為 $\theta_{c,top}$ (top side)、 $\theta_{c,btm}$ (bottom side，前二者若深度不夠，很難觀察量測)、 $\theta_{c,stab}$ (starboard side，顯微鏡可以觀察得到)、與 $\theta_{c,pt}$ (port side，後二者可在光學顯微鏡中觀察量測)，至於表面能(5)與受力大小(6)，也跟著修正如下：

$$E_s = E_0 + h \cdot [2L \cdot \gamma_{sa} - x \cdot \gamma_{la} \cdot (\cos\theta_{c,stab} + \cos\theta_{c,pt})] + g \cdot [2L \cdot \gamma_{sa} - x \cdot \gamma_{la} \cdot (\cos\theta_{c,top} + \cos\theta_{c,btm})] \quad (14)$$

$$F = -\frac{dE_s}{dx} = \gamma_{la} \cdot [h \cdot (\cos\theta_{c,stab} + \cos\theta_{c,pt}) + g \cdot (\cos\theta_{c,top} + \cos\theta_{c,btm})] \quad (15)$$

七、毛細現象的前進速度—integral approach

估計毛細液面前進速度之前，必須將 (14) 式之表面能公式再加上液體動能(kinetic energy) 的部份：

$$E_s = E_0 + h \cdot [2L \cdot \gamma_{sa} - x \cdot \gamma_{la} (\cos\theta_{c,stab} + \cos\theta_{c,pt})] + g \cdot [2L \cdot \gamma_{sa} - x \cdot \gamma_{la} (\cos\theta_{c,top} + \cos\theta_{c,btm})] + \frac{\rho \cdot x \cdot g}{2} \cdot 2 \int_0^{h/2} u(y)^2 dy \quad (16)$$

其中 $u(y)$ 是液體移動的速度，與深淺位置 y 有關； ρ 則是液體的密度。假設接觸角不隨 x 變化，所以仿前面做法，知道作用在液面之作用力為

$$F = -\frac{dE_s}{dx} = \gamma_{la} \cdot [h \cdot \gamma_{sa} (\cos\theta_{c,stab} + \cos\theta_{c,pt}) + g \cdot (\cos\theta_{c,top} + \cos\theta_{c,btm})] - \rho g \int_0^{h/2} u(y)^2 dy \quad (17)$$

(17) 式為整個毛細管內液體所受之表面作用力 (surface force)，等於管壁對液體施加之粘滯力 (viscous force)， $-2\tau_w g x$ 。故毛細管流體的前進速度 $u(y)$ 所滿足的方程式如下：

$$\gamma_{la} \cdot [h \cdot \gamma_{sa} (\cos\theta_{c,stab} + \cos\theta_{c,pt}) + g \cdot (\cos\theta_{c,top} + \cos\theta_{c,btm})] - \rho g \int_0^{h/2} u(y)^2 dy = -2\mu \left[\frac{du(y)}{dy} \right]_{y=h/2} \cdot g \cdot x \quad (18)$$

此地(18)式之求解，係配合無滑動邊界條件： $u(h/2)=0$ 以及中央線對稱條件：

$u'(0)=0$ ，與下列的速度函數假設：

$$u(y)=u_0[1-(2y/h)^2] \quad (19)$$

(19)代入(18)，並假設本矩形毛細管寬度 g 遠大於厚度 h ，上下接觸角都是 θ_c ，

故適合中心線 ($y=0$) 速度 u_0 的代數方程式與其表示式分別為

$$\left(\frac{2\rho h}{15}\right)u_0^2 + \left(\frac{4\mu x}{h}\right)u_0 - \gamma_{la} \cos\theta_c = 0 \quad (20)$$

$$u_0 = \frac{15\mu x}{\rho h^2} \left[\sqrt{1 + \frac{\rho h^3 \gamma_{la} \cos\theta_c}{30\mu^2 x^2}} - 1 \right] \quad (21)$$

(21)式根號項若予以二項式展開，可得到

$$u_0 \approx \frac{\gamma_{la} \cos\theta_c}{4\mu} \left(\frac{h}{x} \right) \quad (22)$$

(22)所顯示之速度近似公式，正比於表面張力，反比於液體黏性與毛細管長度/厚度比值，皆與物理直覺符合。以水為例，假設： $\gamma=0.073\text{Nt/m}$ ， $\theta=70^\circ$ ， $\mu=0.001\text{Pa}\cdot\text{sec}$ ， $h=6\mu\text{m}$ ， $x=300\sim1000\mu\text{m}$ ，則(22)式所預測的中心速度為 $124.8\sim35.4\text{ mm/sec}$ ！

八、毛細現象的前進速度—differential approach

利用大尺寸管內流動的粘性流理論，也可以直接由壓差得到管內流動的速度分布。已知 $u(y)$ 滿足以下微分方程式：

$$0 = -\frac{dP}{dx} + \mu \frac{d^2 u}{dy^2} \quad (23)$$

邊界條件： $u(h/2)=0$ ； $u'(0)=0$ ，而壓力梯度假設為 $\frac{dP}{dx} = \frac{\Delta p}{x}$ ，故

$$u(y) = \frac{\Delta p}{2\mu x} [y^2 - (h/2)^2] \quad (24)$$

壓差帶入(8)式，則毛細管內流體中心前進速度為

$$u(0) = \frac{\gamma_{la} \cos \theta_c}{4\mu} \left(\frac{h}{x} \right) \quad (25)$$

(22)(25)二式型式相同，唯一差別在於：differential approach 的流場解是 integral approach 流場解的二項式展開近似。原來 differential approach(23)的控制方程式過於簡化；其忽略了來自動能的貢獻，故不如 integral approach 分析完整。

九、其他的現象補述

所以毛細管實驗內最重要的量測數據，不外乎接觸角 θ_c 以及毛細液面前緣速度 u_0 。這二者都有賴光學顯微鏡的攝影與紀錄歸納。筆者在稍後的實驗中，將實地驗證上述數學模式預測的趨勢。

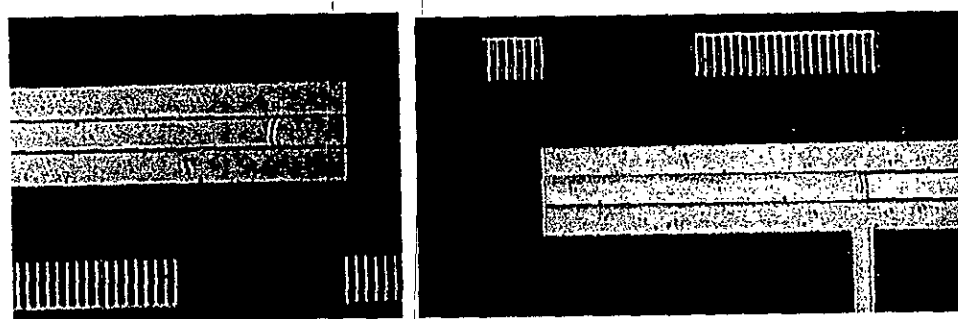


圖 4-5 緩緩前進(左半)與快速移動(右半)的毛細液面前緣

另外要提及的一點有趣現象，如圖 4-5 所示。左半圖是一般毛細面緩緩前進的情形，液面曲線 (meniscus curve) 極為清楚；右半圖則是液體剛剛被迅速吸進微流道入口時的情形，因為速度太快，液面曲線有些模糊 (即使同樣的管壁材質，進行不同的表面處理之後，表面能改變，表面張力改變，前進速度也跟著改變)。不過仔細反覆觀察，可以發覺有兩條液面曲線！二圖的液體都往前流動，但是右圖液體流動的速度遠大於左圖 100 倍以上。

對於上述所謂液面曲線有兩條的情形，判斷是因為上下管壁材質不同，接觸角有差異，導致毛細前緣 (precursor)，在光學顯微鏡下形成一前一後的投影。

另外有關毛細管的矩形截面，因為受限於犧牲層製作的特性，會在管壁兩側角落出現凹陷的角落。換言之，因為光阻顯影之後，側牆 (side-wall) 不夠垂直，整個截面接近梯形。所以表面張力的現象在兩側凹角會特別明顯，這是前述分析 (假設寬度遠大於厚度) 所沒有考慮的因素。

十、初步定性實驗觀察

筆者徵求加州理工學院微加工實驗室博士研究生 Ken Walsh 的同意，以其已經做好用於量測光阻犧牲層在丙酮內溶除速率的流道晶片，先作為定性觀察用的試片，其正面部分圖形如圖 4-6 所示。由於該佈局當初並非專門用來量測毛細作用吸入液體的速度，故雖有量測速率的記號 (每小格 20 微米)，但只足以進行每秒數十微米以下的慢速量測，而且流道的長度也不太夠，最長的部分只有 2mm (兩頭開口，流道寬度 10、20、40、80 微米，另有寬度變化呈 diffuser 或 nozzle 的流道構形)。所以假若以第 7 節末純水的估算速度 mm/sec 為例，在注入液體之後 1 秒鐘之內，便可能充滿整個流道長度，而來不及驗證(22)或(25)式毛細吸入速度是否隨流道長度減小之趨勢。

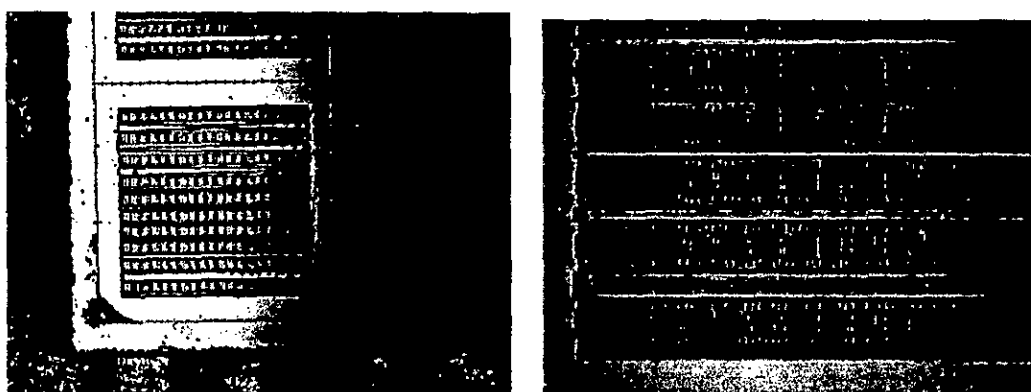


圖 4-6 初步定性觀察用晶片外觀

試片原來的流道空間充斥光阻犧牲層 (厚度 6 微米)，筆者先將晶片浸泡於丙酮之中 24 小時，使其光阻全部溶除，然後再浸泡晶片於並一杯更新乾淨的丙酮中 12~24 小時，以便清除進出口的光阻殘渣；由於流道呈水平直線狀，殘留光阻不易擴散出流道的問題不太嚴重。筆者期望，光阻剛去除之後，流道的

內壁能夠呈現親水性 (hydrophilic)，不管何種液體都可以被吸入。

果不其然，筆者可以在顯微鏡之下，清楚看到 10、20、40 與 80 微米寬的微流道內，不管是純水、丙酮或異丙醇，皆在短時間之內全部充滿微流道。速度上定性的大小順序是丙酮大於異丙醇大於純水，而且純水的速度明顯遠小於前二者。值得注意的是，試片在去除光阻之後，並進行吸入液體之前，若先吸入其他的液體中，會因為管道內表壁塗佈了其他液體的分子，導致表面能或接觸角的改變，使量測出來的流速有所差異。

所以，吸入異丙醇又乾掉的流道，因為內表面呈現恐水性 (hydrophobic)，無法再吸入純水！多次浸泡或填充丙酮且乾掉的流道，內表面也逐漸轉為輕度的恐水性，使吸入純水的速度大幅減慢 (可以相差一到兩個數量級)。至於反覆吸入純水且乾掉的流道，一則因為灰塵渣滓的堆積阻塞，可能妨礙流道的通暢；二則純水乾掉之後，若不等待其完全乾燥，便又立即充填純水，會發覺吸入速度有加快的趨勢。

筆者由 10 與 20 微米寬度的兩條流道，捕捉到每秒鐘約數十微米低速的毛细吸入現象，經過錄影帶事後的追蹤紀錄，得到其位置對時間如圖 4-7：

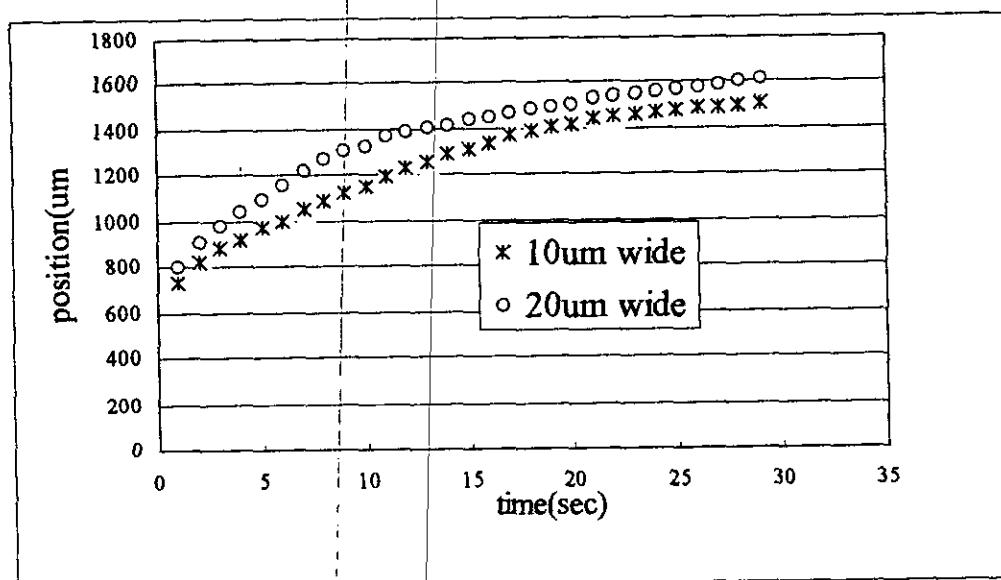


圖 4-7 10 與 20 微米寬度兩條流道的毛细前緣位置對時間關係圖

圖 4-7 之攝影觀察，因為受到充填水珠影像的阻礙，起始時間無法明確界定。另外前幾節的穩態模式 (steady state) 太過於粗略，有必要擴充成暫態模式 (transient state)，以便與觀察到的數據做比較。

十一、毛細前進速度的進一步理論模式

Differential approach (23) 式雖然簡化得太過粗略，不過並不代表不可壓縮流 Navier Stokes 方程式不能描述毛細前緣的速度。今重新考慮一維時變流場，假設只有水平速度變數 u ，但可以隨著 x, y, t 變化；毛細前緣的瞬時位置為 $L(t)$ ，也是隨著時間變動：

連續方程式：(質量守恆)

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0; (\Rightarrow u = u(y, t)) \quad (26)$$

動量方程式：(動量守恆)

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}; \left(-\frac{dp}{dx} = \frac{2\gamma \cos \theta}{h \cdot L(t)} \right) \quad (27)$$

前緣位置： $u(0, t) = \frac{dL(t)}{dt} \quad (28)$

邊界條件： $u(h/2, t) = 0 \quad (29)$

$$\frac{\partial u}{\partial y}(0, t) = 0 \quad (30)$$

起始條件： $u(y, 0) = 0; L(0) = 0 \quad (31)$

有關速度隨著 y 方向的變化，在此地並非最重要的考量，故先假設為二次曲線分布，如下(32)式所示，並且自動滿足邊界條件(29)與(30)：

$$u(y, t) = u_0(t) \cdot \left[1 - \left(\frac{2y}{h} \right)^2 \right] \quad (32)$$

(32)式帶入(27)式，得到

$$u_0'(t) \cdot \left[1 - \left(\frac{2y}{h} \right)^2 \right] = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho h \cdot L(t)} - \frac{\mu}{\rho h^2} u_0(t) \quad (33)$$

乍看(33)式，似乎不為恆等，但只要沿著 y 方向取平均，便可得毛細前緣速度 u_0 對時間的微分方程式

$$u_0'(t) + \frac{12\mu}{\rho h^2} u_0(t) = \frac{3\gamma \cos \theta}{\rho h \cdot L(t)} \quad (34)$$

$$\text{配合前緣位置與速度關係：} \quad L'(t) = u_0(t) \quad (35)$$

$$\text{以及起始條件：} \quad u_0(0)=0; L(0)=0 \quad (36)$$

(34)~(36)組成了求解一維毛細前緣與速度之微分系統。假若全以毛細前緣位置 $L(t)$ 來表示，則 $L(t)$ 滿足以下的二階非線性常微分方程式：

$$(L'' + \frac{12\mu}{\rho h^2} L') \cdot L = \frac{3\gamma \cos \theta}{\rho h} \quad [\text{I.C.: } L'(0)=L(0)=0] \quad (37)$$

由於沒有數學解析解，此地直接利用 Mathematica 求解。室溫水的表面張力 $\gamma=0.073\text{Nt/m}$ ，粘滯係數 $\mu=0.001\text{Pa}\cdot\text{sec}$ ，密度 $\rho=1000\text{Kg/m}^3$ ，流道高度 $h=6\mu\text{m}$ ，接觸角試從 $\theta=70^\circ$ 變動到 89.99° 來逼近實驗數據。模擬結果如圖 4-8。

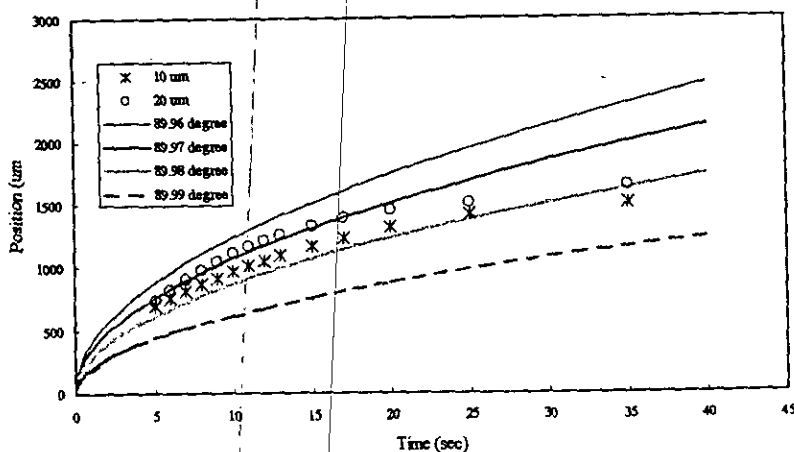


圖 4-8 Mathematica 求解毛細液面前緣位置對時間之關係

在圖 4-8 實驗數據與數值分析預測的曲線逼近 (curve fitting) 中顯示，即使接觸角假設到達 89.99 度，二者的吻合度仍然有限，還需要更多具有重複性的實驗數據當作佐證。另外，水吸入 (Parylene 管壁材質) 微管道的速度快慢相差極鉅；對於毛細作用微弱的情況，即接觸角接近 90 度時，些微的接觸角變化就有大幅的速度變化，這是比較出人意外的結果（當然這種些微的接觸角變化，代表無法直接以一般測量接觸角的實驗來證實。）

十二、實驗改進的方向

(1) 液面流速之測定法

液體吸入毛細管的速度變化極鉅！受限於光學顯微鏡的放大倍率無法任意的調整，在抓取影像之時必須把握時機，適當調整接物鏡的鏡頭攝影所在，以免前進液面跑到攝影鏡頭之外；所以第一次的實驗與攝影，並無法保證一定能夠獲取所需之前進液面影像。兩難的是，當吾人從第一次經驗知道如何適時移動接物鏡頭時，第二次吸入液體時的內管壁表面能與吸入速度又有所改變，所以影像又可能失之交臂！以本實驗為例，接目鏡倍率乘上接物鏡倍率之總放大倍率，若定為 $10 \times 10 = 100$ 倍，整個顯微鏡鏡頭看得到的範圍約是方圓 1mm，所以若是本實驗中的液面流速超過 3mm/sec，比較不易抓取到影像。

另外，沿著微流道事先製作，用以紀錄位置的“尺標記號”，本身也有大小限制，要與顯微鏡的放大倍率作適當的搭配，才能看得清明適度。以本實驗為例，最小的流道寬度不得低於 10 微米；更小的流道不是說看不見，只是無法分辨其中前進液面的位置所在。再者，尺標的間距也只能定為 20 微米，最小的空間解析度估計在 5 微米左右。

由於實驗人員不可能一面攝影、一面紀錄液面位置，前述的實驗攝影技巧，筆者事實上是配合高速 CCD 與錄影機，先得到的一連串類比影像訊號，

紀錄在一般的 S-video 錄影帶裡。事後轉錄成數位化影像 (digital video)，再利用 Premier 之類的電影剪接軟體，重新顯示在電腦螢光幕中，紀錄液面位置與時間的關係。如此類比轉為數位影像的程序，有其好處如下：

- 影像檔可以自由地利用游標任取“暫停”(pause)的影像，精確紀錄位置與時間，而不會有一般類比放影機“暫停”時，影像模糊，雜訊四起，干擾位置判斷的缺點。
- 時間解析度可提高到 1/100 秒。
- 可以同時採“固定時間間距”或者是“固定空間間距”兩種模式，紀錄液面位置對時間的數據。

(2) 微管道入口設計的改良

有鑑於微流道進口水珠，會妨礙起初幾秒鐘液面前緣位置的觀察，微管道入口設計的改良有其必要。其改進方法極為單純，直接在欲觀察的微流道前端，再加上一節十倍寬度的流道。如此可以爭取一段時間，等待灌入之液體進入窄小的微流道。

十三、結論

圖 4-8 實驗數據與數值分析的比較中顯示，二者吻合的程度並非完美。尤其在起初幾秒鐘的差異極鉅。究其原因，有可能是毛細液面在進口區的各種物理效應，並沒有完全涵括在(37)之中。反倒是時間一長之後的接近穩態區域實驗數據，與擴散定律之預測相仿：位置正比於時間之開方。詳情請參閱附錄 H。

本觀察微小管路中毛細液面速度之實驗方法，乃前所未發表之技巧。操作內涵並不複雜，但包含許多有趣的毛細現象，可待進一步仔細探究。

派赴美國加州理工學院研習微機電技術結案報告

第五章「成果彙整」

研習期間：89 年 08 月 25 日至 90 年 08 月 24 日

計畫編號：NSC-89-2217-E-032-001

報告人：楊龍杰 淡江大學機械工程學系

E-mail: Ljyang@mail.tku.edu.tw

編號	研習項目	研習成果
1	學習微加工技術 (本報告第一章全文)	已發表於民國 90 年中華民國微系統科技協會年會
2	研發 EHD 微幫浦 (本報告第二章內容)	成果將投稿 2002 年中華民國奈米技術研討會
3	研究 Gelatin 明膠 (本報告第三章內容)	成果「Photo-patternable gelatin as protection layers in surface-micromachinings」已投稿 IEEE-MEMS-2002 國際會議 (附錄 I) 成果將投稿 2002 年中華民國奈米技術研討會
4	毛細前緣速度探討 (本報告第四章內容)	成果「Marching velocity of a capillary meniscus in microchannels」已投稿 IEEE-MEMS-2002 國際會議 (附錄 H) 成果將發表於 2002 年第二屆兩岸微系統學術研討會
5	研習期間發表之 各類著作	(1) 已編寫「認識微機電」大學教科書，預定 90 年 9 月發行 (2) 「微型流道熱沉與熱管之製作與實驗」已刊登於台大工程學刊 (附錄 C) (3) 「CMOS micro-electro- mechanical bandpass filters」已刊登於國際期刊 Sensors and Actuators A (附錄 D) (4) 「Phase synchronization of micro-mirror arrays using elastic linkages」將刊登於國際期刊 Sensors and Actuators A (附錄 E) (5) 「The zeroth order solution of the velocity field around micro comb structures with lateral oscillation」將刊登於中國工程學刊 (附錄 F) (6) 「The SOI-like method to reduce the die size of bulk-micromachined sensors」將刊登於國際期刊 Sensors and Materials (附錄 G)

附錄 A：KIC 程式：一種設計積體電路之圖形編譯器

初學者手冊

楊龍杰翻譯 2000/10

1. 簡介

該軟體係由美國加州大學柏克萊分校電機系所發展，專門用以繪製積體電路佈局的工具，好處在於易學易通，而且輸出格式為 post-script (*.ps)，可直接供製作光罩、或由高解析度印表機器出圖。戴教授的研究生普遍使用本軟體進行光罩之繪製，並送校外印刷公司，直接在透明膠片上印出空間解析度達 3386dpi 之光罩圖形；換言之，原理上可以得到最小線寬 7 微米之圖形，經過戴教授實驗室中步進對準曝光機(stepper)之十倍縮影，並考量蝕刻側向誤差後，可以轉寫微米等級之微機電元件佈局到晶片基材上。

本初學者手冊原係由柏克萊分校 Ken Keller 與 Giles Billingsley 兩位先生所編纂，譯者採原先講授順序之意譯，一則保留原作者之介紹架構，並且避免逐句翻譯之缺點，讓初學者盡快上手熟練。

KIC 的繪圖版面積與數目相當可觀，假若訂定最小線寬(minimum resolvable unit of distance) λ 為 1 微米，在 x 與 y 方向最大可以各延展 2 億個 λ ，亦即長寬各 200 米的圖板，共 25 層。

KIC 軟體若安裝在 Sun 工作站，其外掛之作業系統為 UNIX，所以必須了解部分 UNIX 系統的簡單指令：

- Login/logout：上機/關機
- ls：顯示檔案與目錄
- cp：複製檔案
- cd：跳到某目錄
- mkdir：開新的目錄
- rm：清除檔案
- mv：移動檔案
- man command.*：線上查詢*指令之功用

若想自個別的個人電腦連線到 UNIX 主機來使用 KIC 程式，PC 必須先安裝好 Exceed-95 程式套件，之後執行其中之 Xstart 啟動指令，螢幕會出現 Xstart Client Startup Application 的對話盒，請分別在 start method 選定 REXEC

(TCP/IP)、Program type 選擇 X Window，Login 部分則填入 UNIX 系統的使用者帳號(User ID)與密碼(Password)、UNIX 工作站主機的名稱(Host)、工作站的類型(Host Type，通常是 SUN)、以及 Command (@[XTerm, method=stdappdb] -display @d&; 請注意空格)，然後點選 RUN，若一切連接合適，螢幕會直接進入 UNIX 系統，不必再登入(login)。之後的啟動程序見下一節描述。執行完離開時請存檔(通常用與自己相關的稱謂)，下回再載入時，便不用再輸入以上資料，從 File / Open 開啟前述名稱的*.xs 檔，然後執行 Run 就可以了。

另外要留意：PC 螢幕的彩色解析度只需設定成 256 色，便足夠繪製光罩佈局(設定成全彩反而無法開啟 xkic 程式)。

2. 啟動 KIC 程式

登入 UNIX 後，系統會詢問用何種終端機視窗模式，請鍵入

X

啟動 X-window，終端機螢幕會由單純黑白背景，轉換至彩色背景(若是以 Xstart 連線且已進入 UNIX，則已經是 X-Window 了)，此時才開始啟動程式。請轉換到 KIC 主程式所在之目錄，並鍵入

xkic &

數秒鐘後，螢幕右下方出現反應，按住右鍵並儘量移動至左上方然後放手，以定義出最大的繪圖窗口(PC 連線者，則直接出現全編輯螢幕，不必再拉。)

3. 螢幕的外貌

整個螢幕分割成幾個視埠(viewport)：

- 左側是指令選項(command menu)；
- 彩色繪圖區下緊接即時視埠(prompt viewport)，顯示軟體的訊息與你輸入的回覆。每當顯示
-more-
時，表示有更多的訊息，請按 return 繼續閱讀。
- 更下方是所謂圖層選項視埠(layer menu viewport)，每一個色盒(color box)可指定成某 IC 薄膜結構或某圖層名。通常

NI 代表離子佈植(N 是 nMOS 結構)、

ND 代表雜質擴散、

NP 是多晶矽膜、

NM 是金屬、

NC 是接點灌孔、

NG 是 overglass

等等。另外 LYRL 與 LYRR 是 LYRA 佈局法則驗證程式。

- 最下方是參數視埠，顯示位置的訊息、被編輯之圖檔名、以及繪圖區寬度是幾個 λ 。
- 主要繪圖視埠分粗視埠與細視埠兩部分，以右鍵點出粗圖的一個方塊區域，即可在細視埠上得到放大的影像。但在下達編輯佈局命令之前，只有 KIC 程式的 LOGO 出現，看不見繪圖視埠。

4. Pointing

游標以小 x 的模樣出現在螢幕中。按滑鼠左鍵或鍵盤空格鍵，便執行指令或更換圖層。

5. 編輯一張光罩佈局 (cell)

所謂 cell，指光罩的集合或佈局(mask sets or layouts)。

若按指令列之

EDit

KIC 程式會在即時視埠詢問佈局圖檔名，圖檔名長度限制在 14 個字元，並建議加上字尾 .kic，作為檔案分別之依據，免得與其他副檔名為 cif 或 mann 的檔案攪混。

(若鍵入的是舊檔名，即繼續先前之編輯。若一開始顯示一張空白新圖，看不到原先的佈局，這是因為縮放格式或比例不同，造成先前別人編輯的圖形太小或太大！只需以 5.6 節 Zoom 或 Pan 指令即可重新顯示於螢幕上。)

假如想要離開 KIC 程式，只需按

ABort

便立即跳回 UNIX 系統。

5.1 Fine Positioning ; The Magnifying Glass (就是細的繪圖視埠)

進入編輯 cell 後，粗視埠中央有一個黑線方框，代表右邊細視埠(就是 magnifying glass)顯示的區域。移動游標然後按滑鼠中央鍵，粗視埠黑線方框會移動到游標所在，當然細視埠也跟著改變景象。先按鍵盤 ctrl-f，再移動游標按滑鼠左鍵，是一樣的效果。

Ctrl-g 的功能不清楚

Ctrl-t 改變粗、細視埠的擺放方位，正常是左右配置，按一次改為上下配置，再按一次切換還原。

5.2 Expanding Instance (擴展圖例)

部分 cell 可能包含幾何圖形與一既大且具名稱標籤提示的方盒，該方盒是一圖例(instance)的符號或未擴展圖形(symbolic or unexpanded picture)。所謂圖例只是一參考且具定位之 cell，名稱與尺寸附於方盒左下側。按以下功能：

EXpnd

將發覺該圖例擴展而全然顯示於粗、細視埠之上(當然名稱不顯示出來)，此時 KIC 處於擴展模式。再按一次 **expnd**，恢復未擴展模式。若按下述功能：

PEek (偷窺)

則只有擴展顯示在細視埠之上。

5.3 Traversing the Hierarchy (同層切換與圖形階層)

前一段之圖例算是原來 cell 之下層圖形。類似之圖形階層可擴展到 100 層！

讓 KIC 程式回到未擴展模式，再按以下功能：

SElec (常用)

則進入選擇模式。左側功能視埠將出現一個次功能視埠：選擇視埠(有 push, pop, basic 以及其他次功能，此節先說前三種次功能，更常用的選擇系列次功能見第 7 節 selection 部分)。此時點選回圖例(外框發亮)，也會看到一個鑽石狀的圖例記號確認該參考點位置。點選選擇視埠之次功能：

PUsh

則圖例置中顯示完全，但是 KIC 程式還是在未擴展模式。再點選：

POP

則又回到原先 cell 模樣。KIC 記住了整個圖形階層的來龍去脈，所以可使用上述兩指令上下來回觀察圖形。假如下層圖例有任何修改，以 **pop** 回到上一層 cell 後，再以 **expnd** 進入擴展模式，將可以看到該修改圖例如何反應到 cell 中。

現在，以選擇視埠之次指令

BASic (常用)

回到基本的功能視埠，且讓 cell 再以 **expnd** 進入擴展模式中。

5.4 Grids (網格)

若按指令列之

Grid (常用)

即時視埠會詢問每一網格的寬度，請輸入幾個 λ (若沒顯示，代表網格的輸入值太小)。若不想顯示網格，輸入 0。另有指令

SNap (常用)

用以讓游標咬住網格，固定幾單位幾單位地移動(該長度幾個 λ 必須輸入)。當然所有座標也都成為固定幾單位之倍數。

5.5 Command Line Arguments

先前啟動 KIC 前，已經輸入了

xkic [cell.name] &

若之前沒有輸入 cell.name，KIC 程式將會要求以

EDit

指令輸入 cell.name，再進行修改。

假如想要離開 KIC 程式，只需按

ABort

便立即跳回 UNIX 系統。

5.6 座標系統

光罩圖形所在為一平面卡氏座標，全以整數表示，正負各有 200,000,000 單位(λ)。

游標所指之處，若按下左鍵，在參數列中會出現該點之平面座標 $x y$ 各為多少。移動至他處再按一次，除了第二點的座標外，更顯示出前後兩點之距離 $dx dy$ 各為多少。指令列中另有一功能常用：

PAn (常用)

可讓游標與細視埠在圖板上到處游移。滑鼠左鍵所點之處，成為新景觀之中央。若要移動到粗視埠看不見或點不準的所在，可改用：

ctrl-c

然後輸入新中心點的座標：

$x y$

達到相同的效果。試著選用

Zoom (常用)

用來放大視埠之倍率。輸入數字代表視埠的長度，長度越小，景觀越放大，但是看得到的區域越小。低於某數字之後，粗視埠會消失(前述要移動到左邊粗視埠看不見所在的方法，便是 zoom 之後輸入比較大的數字，如 1000 或 1500，直到看見要移動的所在，再以 pan 指令配合滑鼠左鍵移動過去)。另外

WINdo

是以滑鼠左鍵來點選定義放大的區塊(視窗模式)，不管放大倍率如何，粗視埠都會消失。(因為粗視埠會消失，不好用。比較方便的方法是直接用滑鼠右鍵在左邊粗視埠點選中央小方框的區域大小，以便放大或縮小右邊的細視埠。)

6. The Layer Attributes Menu (圖層屬性)

圖層屬性包括：優先權(priority)、可見度(visibility)、圖名(name)、顏色(color)、最小尺寸(minimum dimensions)、輪廓(outlining)、閃爍(blinking)、符號(symbolic)。例如在優先權方面，黑色優於紅色，黃色(螢幕下方最左邊圖層)優先權是最低的。所謂優先權高，代表疊在其他色層的上方，不會被遮住。

圖層屬性的原因，在於各圖層實際製作 nMOS 時，有其先後順序。當然使用者也可以自行定義一套像是十道 CMOS 光罩的圖層譜(layer menu)，但是圖檔副名必須是 *.KIC。如何建構 *.KIC 檔案將於第 16 單元中討論。

當 KIC 程式運作時，只要按下

ATtri

功能視埠將出現屬性 menu，供現場更改六種圖層的屬性。假若要更改某圖層之填滿圖形，----

畫好佈局後，由於仍有一些圖形是介乎幾個圖層之間，有時不易確定是否有無畫錯，故在屬性的次功能表上比較迫切的部分是：

VISib

也就是只顯示部分圖層的指令。使用的順序是在按下上述功能後，立即以滑鼠選取所要顯示的圖層，不限一層，然後按 **RDraw**。

7. Selection

在主要基本功能面板上，不能直接點選已經繪製圖形的任一片段，必先點選：

SElec (極為常用，其實花在本次功能群的時間，約佔全部佈局圖形編輯時間之八成！)

進入本次功能面板。共分成七小群次功能：

第一群有 **BASic**(回到主功能面板)、**SAve**(存檔，檔名不變)、**WRite**(存檔，檔名必須另外輸入)，比較單純。

第二群有 **RDraw**、**EXpnd**、**PEek**、**PAn**、**Zoom**、**WINDo**、**LASt**，保留了原先主功能面板的功能。

第三群有 45s(代表所有斜角限制在 45 度角的倍數)、BOXes(畫方格)、WIRes(畫細線條)、WIDth(設定線寬)、POLyg(畫多邊形)、LABel(標記號)、Undo(取消前一次繪圖指令，注意，只有前一次！)，多是以滑鼠左鍵點選開始、中間、末了等位置，第 8 節還會詳述。

第四群有 LAYer(圖層，與直接點選下方圖層色格的效果一樣)、AREa(能把滑鼠圍住的方框內繪圖物件全部點選出來，被點到的物件邊緣會發亮)、SElec(就是個別點選繪圖物件的功能，被點到的物件邊緣會發亮)、DESel(放棄已經點選的繪圖物件，通常是點選錯誤，或完成點選物件的編輯處理功能之後使用。建議在按 Basic 回到主功能面板之前，一定要核對是否已經按了此功能鍵)、CHlYr(係將已經選定的物件直接更改圖層歸屬)、DELete(將已經點選的物件予以去除)。

第五群有 STPth(拉寬已經點選的線條或多邊形)、STBox(拉長已經點選的方格)、LEft、Top 等指令。

第六群有 MOVe(移動物件)、COpy(複製物件)、MX(針對鉛垂線做物件之鏡射圖像)、MY(針對水平線做物件之鏡射圖像)、O(物件處理之後與先前的角度差，其依序點選還有 90、180、270 等角度選項)。在進行本群圖形編輯功能時，都必須先完成前述繪圖物件之點選(SElect)，且先行決定物件處理之後與先前的角度差(0、90、180 or 270)，然後依移動、複製、或鏡射功能來處理物件。程式會詢問參考點與末了點，請均以滑鼠左鍵輸入。通常本系列功能的做法，係先進行複製或鏡射到大概位置(儘量不要與原來之圖形重疊)，再以移動指令使其就設計之定位，操作修改期間被選定的物件無須取消，但最後還是要記得 DEsel，才能點選下一組繪圖物件。

第七群有 PUSh 與 POP，功能請見 5.3 節。

8. KIC Layout Geometries

(略)

9. 轉換成 post-script 檔的程序：

(這是 Caltech 微加工實驗室自己寫的 UNIX 批次指令程式，不是到處都能用！)
跳至 UNIX，假如檔名叫做 aaa.kic

輸入

kictocif

先執行將 kic 檔轉成 cif 檔的程式，會出現以下問項：

Microns per lambda? 1

Hierarchy's root cell? **aaa.kic**

Select layers you wish to be visible -

“s” symbolic only

“d” detailed only

“a” all layers

? a

Translation of aaa.kic succeeded.

[2] - Done xkic aaa.kic (代表初步 OK!)

然後輸入

emacs center &

是編輯一個叫做 center 的 UNIX 批次指令檔(現在只能在一張透明膠片上印出兩層光罩圖形)，會出現另一個編輯的視窗，請移動游標，在需要個別顯示成光罩圖形的圖層上輸入 G0，例如

ciftops -s NM="G0" aaa.cif 1.ps (產生 1.ps 光罩檔，具有 NM 圖層)

ciftops -s NP="G0" aaa.cif 2.ps (產生 2.ps 光罩檔，具有 NP 圖層)

mergeps 1.ps 2.ps test.ps (將 1.ps 與 2.ps 兩張光罩檔合印在 test.ps 之上)

若圖層 NM 需要反白印出，則設定如下：

ciftops -s NI="G0" -s NM="G0" aaa.cif 1.ps (產生 1.ps，具有 NI 全部佈滿的底板與 NM 二圖層疊在一起)

ciftops -s NP="G0" aaa.cif 2.ps (產生 2.ps，具有 NP 圖層)

mergeps 1.ps 2.ps test.ps NM (將 1.ps 與 2.ps 合印在 test.ps 之上；但是 1.ps 的光罩部分是將 NI 全部佈滿的底板扣掉 NM 圖層的部分，也就是 NM 圖層的反白。)

然後按 Ctrl+x 與 Ctrl+s 予以存檔，跳回 UNIX，輸入

center

出現一堆輸出的反應後，若看到

[2] - Done emacs center

則代表轉換格式設定 OK，具有二層光罩實體佈局的 test.ps 已經產生出來，可用 GSview 程式(或 Acrobat Distiller 4.0)予以審視。假若欲在光罩邊緣加上說明辨識的文字，需在 **emacs center &** 中另行修改該 test.ps 檔案。

10. 送件

若審視後皆沒有問題，就可以送製膠片。Pasadena 此地之廠商是 PCI 公司，電子郵件信箱是 pci@danwolfe.com，委託信件之例(戴教授學生姚賜榮先生所發之信)如下：

California Institute of Technology
Electrical Engineering, Mail Stop 136-93
Micromachining Group, 626-395-8477

Date: 11/3/00
Time: 2:30 pm

Dear PCI,

This is a request from the Caltech Micromachining Group for printing high-resolution (3386 dpi) linotronic films (8.5 by 11, positive).

Number of files/films: 2
File name(s): ehd-1.ps, ehd-2.ps

The films will be used for some delicate scientific research and the exact dimension of the patterns is very important to us. Please avoid exposing them to heat. Also, please keep the films clean. We would appreciate it if you could put each film in a separate bag and then put all bags in another bag. Please do not put any other things such as floppy disks and papers in the same bag with films.

If you have any questions, please call Tze-Jung Yao @ 395-2267. For billing questions, please call Tanya at 395-4820.

Please leave a message on 395-2267 after you finish the job, so I can go pick them up.

Thank you.
Caltech Micromachining Group

附錄 B：化學耗材清點

Chemical Count of Micromachining Group in Caltech

Caltech Micromachining Laboratory Chemical Inventory									
OK ORDER									
Date Performed		2009/10/27							
Check Performed by:		Steve							
Location	Category	Chemical Name	old status	current status	Min. Stock	Am't. To Buy	Below Min? check	On Order since	
MOORE									
Wino (yellow) rm fume hood	Misc	Minimum 4 Boxes (unopened)	7	7	4	0	OK		
west etch lab	Silicon Etchant	TMAH	5	4	2	4	OK		
		KOH (EM brand) SS	6	5	2	4	OK		
	Non Chemical	HDY PLATES							
		(K-Fuse hood) A	9	8					
		(K-brown) B	1	1					
		(G-Wetling wall) C	1	1					
		(Corroded) D	1	1					
service chase (ile SS)									
small cab	Oxide Etchant	Rad etch	2	2	1	1	OK		
		Buffered HF	8	5	3	4	OK		
		Concentrated HF SS	3	3	2	3	OK		
		AZ 351	7	7	2	0	OK		
		AZ Developer	2	2	2	0	OK		
yellow cab	Parylene	Parylene - C	n	n	below marked line?		OK		
		Parylene - N	n	n	below marked line?		OK		
		Parylene - D	n	n	below marked line?		OK		
	Resist Strippers	Stripper ACS 51-22	1	1	1	4	OK		
		ACS PGR Stripper Rinse	1	1	0.5	4	OK		
		AZ 400 K	5	5	1	4	OK		
	Organic Chem	Isopropyl Alcohol (4L) SS	2	2	1	1	OK		
		Acetone (4L) SS	2	2	1	1	OK		
blue cab	Metal Etchant, ACOS	Ammonium Hydroxide	1	1	2	200ml	OK		
		Al Etchant	0	2	1	200ml	OK		
		Nickel Etch type IFA	2	2	1	1	OK		
		Cr Etch (red stain)	2	2	1	1	OK		
		Cr-7 (yellow stain)	1	1	1	2	OK		
		Az Etchant	1	1	1	200ml	OK		
		Phosphoric Acid SS (BUYER BRAND)	1	1	1	1	OK		
		Sulfuric Acid SS	2	2	1	1x 500ml	OK		
		Acetic Acid SS	1	1	1	1x 500ml	OK		
		HCL SS	1	1	1	1x 500ml	OK		
		Nitric Acid SS	1	1	1	1x 500ml	OK		
metal lab	Thermal Evaporator	Gold (shot) include bottle weight	65.4	65.5	30		OK		
		Copper (pieces) include bottle wt	188	188	30		OK		
	please weigh the whole bottle	Aluminum (large spool of wire)	525	525	25		OK		
	bottle = ~10grams	Titanium Wire (1 of 1mm)	2	0	2		ORDER		
		CRW3 Chrome rods	21	19	20	50	ORDER		
		SS304/304W	77	77	25	50	OK		
		F-16A Rods	20	18	8	25	OK		
		SS304/304W	1	0	25	25	OK		
diffusion service chase									
yellow cab	Mac Chemicals	Ammonium Hydroxide	2	2	2	200ml	OK		
		Microethylene (ICE) SS (new Star)	3	2	2	4L	OK		
		H2O2	2	2	2	2	OK		
	Photo-Resist	AZ 460	0.5	0.4	0.5	1	ORDER		
		AZ 462	1.2	1.1	0.5	1	OK		
		AZ 150	0.5	0.7	0.5	1	OK		

note to Arish: Steve has primary quantity

Instructions:

1. The chemical count person should print out this list, check the chemical inventory and update the "current status" column
2. Yong will check the list and tell the chemical count person to buy the chemicals that are available on campus.
3. It is Yong's responsibility to tell the chemical ordering person (Jun Xie) to order the chemicals that are not available on campus. Please do not tell Jun Xie what to order without consulting Yong first.
4. Hydrogen peroxide is stored under the piranha wet-bench in Steele CR.
5. Oxygen tank changing procedure:
 - 甲 · Disconnect the regulator from the old bottle and reconnect it to a new bottle.
 - 乙 · Do a leak test on the regulator connection using snoop.
 - 丙 · Lay down the empty bottle outside room 33 and label it "empty" using chalk.
 - 丁 · Call 4891 to order a new bottle of oxygen and make sure it is UHP grade.
6. When counting chemicals, do not count a fraction of bottle unless minimum stock value is less than ONE!
7. Any opened bottle or bottle with seal broken is considered consumed.
8. If minimum quantity is in 500ml sizes, then ONLY buy 500ml BOTTLES!

微型流道熱沉與熱管之製作與實驗

楊龍杰* 康尚文* 杜文謙*

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF MICROCHANNEL HEAT SINKS AND HEAT PIPES

Lung-Jieh Yang* Shung-Wen Kang* Wen-Chien Duh*

Abstract

With the improvement of circuit density and operating speed, more heat is generated by the electronic elements. Heat dissipation has become a significant issue in efficiency promotion and stable operation.

Silicon based micro heat sinks and micro heat pipes fabricated by MEMS technology may provide new ideas and approach of efficient cooling. Experimental tests and theoretical analysis were conducted to investigate the characteristics of fluid flow and heat transfer in these micro cooling elements.

Especially, subjected to the mechanism of bubble nucleation, thermal conductivity of micro heat pipe and the possibility of monitoring measurements inside micro channel.

Keywords: Silicon, micro channel, heat sink, phase change, micro heat pipe, star channel, capillarity, on-site measurements, micro sensor.

摘要

隨著電子元件速度增快，發熱量日益升高，散熱成了提昇元件性能與穩定運作的重要課題。以微機電製程所製作的矽質微流道熱沉與微熱管均熱片，提供另一種新的散熱思維與途徑。本文以實際微機電元件之製作測試及相關簡要的數據分析，探討此二種矽質微流道散熱元件的流力特性及相變化熱傳性能，特別是針對微流道中的汽泡成核機制、微熱管的熱傳導係數、以及微流道內部監控量測之可行性，作一回顧式之報告。

關鍵詞：矽、微流道、熱沉、相變化、微熱管、星形流道、毛細作用、現地量測、微型感測器。

1. 前言

台灣目前已躍升為筆記型電腦的生產大國，各

大廠商除了面臨 CPU 的發熱問題外，更面臨到消費者對筆記型電腦機體變輕、變薄的強烈渴望，目前雖然利用新的材料（鋁鎂合金）作為外殼，配合

民國 89 年 10 月 17 日收稿，89 年 10 月 23 日修定，89 年 10 月 23 日接受

*淡江大學機械工程學系助理教授

*淡江大學機械工程學系副教授

*淡江大學機械工程學系教授

Manuscript received October 17, 2000, revised October 23, 2000, accepted October 23, 2000

*Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Tamkang University, Tamsui, Taiwan 25137, R.O.C.

*Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Tamkang University, Tamsui, Taiwan 25137, R.O.C.

*Professor, Department of Mechanical Engineering, Tamkang University, Tamsui, Taiwan 25137, R.O.C.

小型熱管與風扇的組合來應付需求，但其所能提供的散熱能力已遭遇瓶頸，此外，如個人數位式輔助系統 (personal digital assistant, PDA) 等小型的可攜式電子裝備以及各種小型的電子控制裝置，同樣會因為體積的縮減，性能與功用的不斷提昇而面臨到發熱困擾。

現今電腦會產生高溫的原因，是因為要獲得更快更強的處理能力，但一則體積受限，二則半導體製程的線寬從 $0.18\mu\text{m}$ 降到未來的 $0.1\mu\text{m}$ ，造成電子元件晶片單位面積發熱量之急遽升高；而傳統散熱方式速度過於緩慢，局部高溫熱點 (hot spot) 所形成的晶片熱應力不均，將會導致電子元件效能減低或損壞。因此，如何均勻的將熱消散並消除熱點，成了高速晶片妥善運作的重點，此即為本文所要探討的範疇：如何設計新型的熱沉 (heat sink) 與熱管 (heat pipe) 並應用於高瓦數散熱的課題。

2. 微流道熱沉

2.2 緣由與目的

以微流道 (micro-channel) 作為新型的熱沉與熱管之構型，時有所聞。咸認為層流流體在微流道熱沉中的熱傳效果優於傳統大尺寸管路中的紊流態，而相變化過程所帶走的熱量更高，足可應付未來高功率電子產品所產生的廢熱。由於近年來自半導體製程發展出的微機電系統 (MEMS; micro-electro-mechanical systems) 相關技術日趨成熟，故可製造出水力直徑 (hydraulic diameter) 數十至數百微米之微流道，透過液體強制對流的使用，來試圖解決電子產品之過熱問題。

最早提出結合微機電系統與微流道熱沉技術概念的是 1981 年的 Tuckerman 及 Pease [1]，其探討微流道熱沉的熱傳性能，並對微流道熱沉施以最佳化設計。實驗結果顯示其最大熱通量達到 $790\text{W}/\text{cm}^2$ ，可應用於高功率密度的超大型積體電路 (VLSI) 上。

Yang 及 Zhang [2]、Peterson 及 Ortega [3] 等指出，熱控制最好的方法便是將熱沉與電子裝置儘可能的靠近結合在一起。Pfahler [4]、Choi [5]、Mohiuddin-Mala [6] 等人亦提到微流道熱沉不僅擁有絕佳的散熱效果，其流體行為或熱傳特性均與傳統大尺寸管道的實驗結果大不相同。

Peng 及 Wang [7~11] 則從事了一連串以相變

化為主的微流體研究。其發現當流道壁施以較高的熱通量或過熱溫度時，根據現有的沸騰曲線預測應該產生核沸騰，結果卻沒有發現汽泡在微流道中產生。換言之，流道的幾何尺寸大小會嚴重影響流體的相變化行為，此對於二相流之研究而言，是非常有趣且重要的發現。Peng 及 Wang [12] 在 1998 年更提出核沸騰在微流道中幾乎不可能發生的觀點，並以兩個假設的概念「蒸發空間」(evaporating space) 及「虛擬沸騰」(fictitious boiling) 來描述此微流相變化現象。

針對上述現象，本文第二部份企圖以較嚴謹的實驗途徑，來探討流體流經微流道熱沉的相變化熱傳特性，以期能對微熱流的基本原理多所了解。

2.2 微流道熱沉製程與封裝

本文選用 (100) 矽晶片 (silicon wafer) 為基材 (substrate)，經非等向性濕蝕刻 (anisotropic wet etching) 之後，由於單晶矽之特性，可得到非常光滑之 {111} 斜面及 {100} 底面；前者之平均粗糙度 (R_A ; average roughness) 更可到 0.1 微米以內。此構型符合理論的幾何假設，並方便實驗的分析探討。微流道凹槽的示意圖及相關規格如圖 1 及表 1 所示。

矽晶片作為微流道熱沉基材之優點，在於與電子元件材料相同、製程相近，未來容易整合一起。在本研究之晶片上更設計了加熱用電阻，可供熱流實驗使用。製程流程如圖 2 所示，採用矽質體型微細加工 (silicon bulk micromachining)，其中包括薄膜沉積 (thin film deposition)、光蝕微影 (photo-lithography)、非等向性濕蝕刻、與雜質擴散 (dopant diffusion)，以得所需的微流道凹槽形狀與其上之加熱電阻。而微流道的封合則採用矽晶片與 Corning #7740 玻璃的靜電接合 (anodic bonding)。

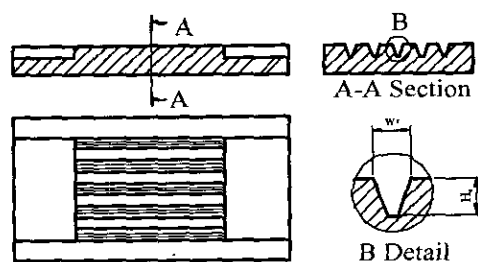


圖 1 微流道凹槽示意圖

Fig. 1 The top view and the cross-section view of a silicon micro-channels chip

表 1 測試試片規格表

Table 1 The dimensions of the silicon micro-channels chips

試片	流道寬 (μm)	流道深 (μm)	水力直徑 (μm)	流道 數目
Chip 1	500	260	267	8
Chip 2	400	260	221	10
Chip 3	500	130	188	8
Chip 4	400	130	173	10
Chip 5	300	130	150	13
Chip 6	250	184	134	15
Chip 7	200	148	109	19
Chip 8	150	113	83	25
Chip 9	100	78	57	38

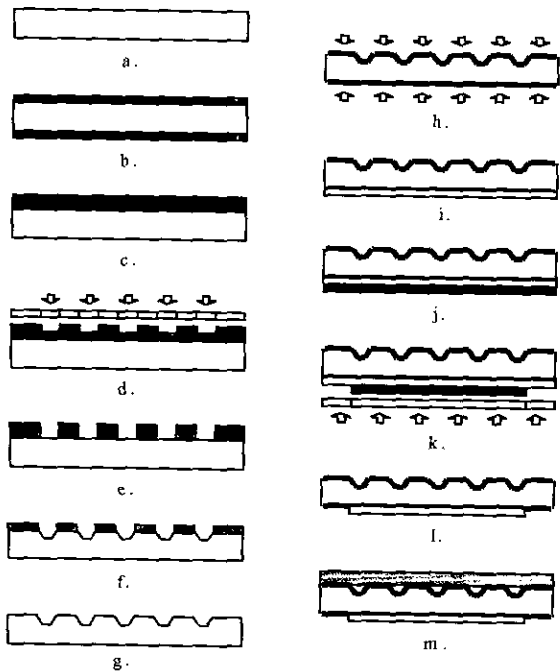


圖 2 矽質微流道製程示意圖。a：(100) 清潔矽晶片，b：成長氧化層，c：光阻塗佈，d：曝光微影，e：BOE (buffered oxide etcher) 開蝕刻洞口，f：KOH 蝕刻，g：BOE 去除氧化層，h：高溫擴散電阻，i：背面蒸鍍鋁層，j：背面光阻塗佈，k：背面曝光微影，l：蝕刻鋁接點，m：與玻璃靜電接合

Fig. 2 The processing flow of fabricating a silicon micro-channel: a. initial-clean of silicon wafers; b. growing oxide layer; c. coating photo-resist; d. UV-light exposure; e. opening the etching-hole by BOE; f. anisotropic KOH etching; g. stripping oxide layer by BOE; h. diffusing resistors; i. Evaporating aluminum layer on the wafer backside; j. coating photo-resist; k. double-side lithography; l. etching aluminum pads; m. anodic bonding with a glass substrate

2.3 測試設備與實驗概述

此地採用等熱通量 (constant heat flux) 的方式進行熱傳測試，以加熱電阻模擬電子元件的熱點，利用微流道熱沉進行熱傳性能測試。實驗測試循環如圖 3 所示，包括工作流體循環系統、冷卻流體循環系統等，測試模型如圖 4 所示。

實驗測試中，工作流體利用外部冷卻循環系統及進入微流道前的熱交換器 (heat exchanger) 而保持在一個均溫的狀態。工作流體由儲存槽 (liquid tank) 以幫浦 (liquid pump) 加壓經過測試區段和流量計 (flow meter)，旁通管路則允許部份工作流體流回儲存槽，同時確保工作流體在儲存槽中得以良好的混合及保持均溫。

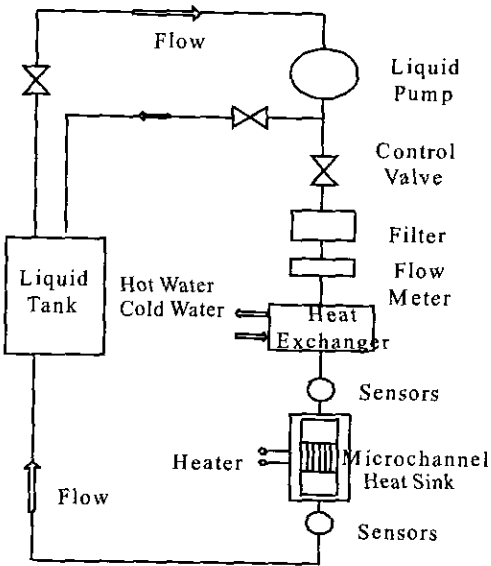


圖 3 測試循環示意。外圈是工作流體循環系統，內圈是冷卻流體循環系統

Fig. 3 Experimental set-up for the silicon micro-channel heat sink

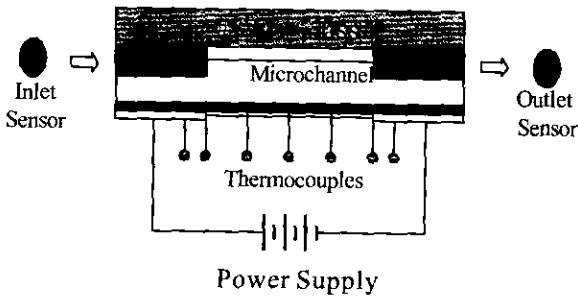


圖 4 測試模型示意

Fig. 4 The cross-section view of a micro-channel heat-sink sample

微流道熱沉進出口裝設有量測溫度及壓力的熱電偶 (thermocouple) 及壓力感測器 (pressure sensor)，熱沉背面並黏貼兩組熱電偶以量測微流道壁溫，量測數據則由資料擷取系統連接電腦輸出。加熱功率以一電源供應器控制，並記錄其電壓及電流值。工作流體的流量由流量計控制，而流量計則先以權重法 (weighing method) 加以校正。每一次測試中，必須先使系統達到穩定的狀態，才能進行量測記錄。

2.4 理論與數據分析

實驗測試所得的數據由以下相關的理論公式加以計算歸納：

摩擦因子 (friction factor)

$$f_{thy} = \frac{64}{Re} \quad (1)$$

$$f_{exp} = \frac{2g_c \Delta P D_h}{L \rho_f V_f^2} \quad (2)$$

流道進出口壓力降 (Pa)

$$\Delta P_{loss} = K \frac{\rho_f V_f^2}{2g_c} \quad (3)$$

各符號代表意義如下：

f_{thy} ：摩擦因子理論值

f_{exp} ：摩擦因子實驗值

g_c ：單位轉換因子 (1.0 kgm/Ns^2)

L ：流道總長度 (m)

ρ_f ：工作流體的密度 (kg/m^3)

V_f ：工作流體的速度 (m/s)

ΔP_{loss} ：流道進出口壓力損失 (Pa)

K ：壓力損失係數

在壓力量測方面由於微流道尺寸過小，一般壓力感測器無法做現地量測 (on-site measurement)，因此所量測的壓力必須扣除流道進出口所造成的壓力損失，亦即 $\Delta P_{loss} = K \frac{\rho_f V_f^2}{2g_c}$ 為流道進出口壓力損失係數，在此採用進口區 $K = 1.0$ ，出口區 $K = 0.5$ 估算 [6]。

熱通量 (Heat Flux)：

$$q'' = \frac{rIV}{LW} \quad (4)$$

(4)式中 I 與 V 分別代表電源供應器所施加的電流及電壓， L 與 W 則為微流道熱沉的長度及寬度。修正因子 r 可用來估算所有的損失熱量，在此以微流道進出口的顯熱 (sensible heat) 來修正確實的加熱量。

熱對流係數 (heat transfer coefficient)：

$$h = \frac{rIV}{A(T_w - T_f)} \quad (5)$$

(5)式中 A 代表微流道熱沉與工作流體所接觸的總面積， T_w 為微流道壁溫，由黏貼在熱沉背面之兩組熱電偶所量測的溫度平均而得。 T_f 則為工作流體溫度，由進出口之熱電偶所量測的溫度平均而得。

2.5 實驗結果與討論

本文以實驗的方式進行微流道熱沉的熱傳性能探討，特別針對相變化部份。實驗中以甲醇為工作流體，在不同幾何形狀及不同流量下進行測試，更以實際的視流 (flow visualization) 觀察加以驗證說明。

1. 流力實驗

流力部分之實驗主要探討流體在微流道中的摩擦因子變化，以 Chip 1 ~ 7 作為測試試片，利用不同的流量通過微流道，量測其壓力降而得。圖 5 為摩擦因子與雷諾數以對數尺度表示的關係圖，由圖中可發現七組試片的測試結果大多分佈在理論值右上方，且明顯呈對數線性變化，表示此時流體

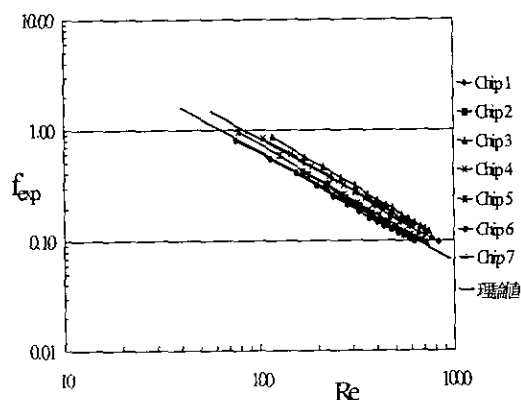


圖 5 摩擦因子實驗值 f_{exp} 對雷諾數 Re 之對數座標變化

Fig. 5 The experimental skin-friction coefficient vs. Reynolds number (logarithmic scale)

大致處於相似之層流狀態，摩擦因子約隨雷諾數之冪次 (power) 變化。此與 Peng 等人在文獻 [8] 中之矩形微流道實驗結果大有差異：後者之微流道流體由層流轉變至過渡區 (transition) 的臨界雷諾數，約在 200 ~ 700 便提早發生，但是本文之實驗並無此現象，可能原因為微流道熱沉基材的差異及加工方式不同所造成。

Mohiuddin-Mala 等人 [6] 的梯形矽質微流道試片幾何形狀，與本文採用者類似。Mohiuddin-Mala 指出微流道中的形狀因子 (f 與 Re 乘積)，不似一般圓管中保持固定值 64，而是 64 的 ($f_{exp}/f_{thy} =$) 1.0 ~ 1.6 倍；本實驗之 f_{exp}/f_{thy} 結果如圖 6 所示，亦在 0.9 ~ 1.6 之間變動。

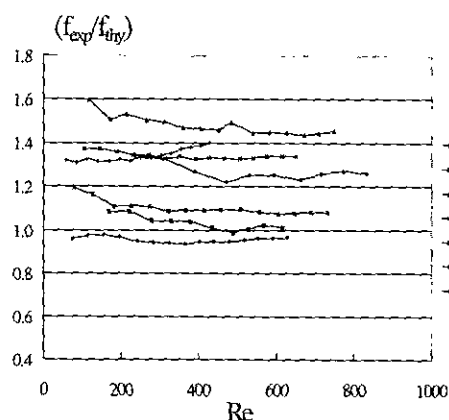


圖 6 (f_{exp}/f_{thy}) 對 Re 之變化

Fig. 6 The ratio of experimental and theoretical skin-friction coefficients vs. Reynolds number

2. 熱傳實驗

熱傳部分之實驗中首先利用相同流量通過九組不同幾何參數的微流道進行測試，實驗結果如圖 7、10、13、14。另外圖 8、9、11、12 為 Chip 2 及 Chip 6 針對不同流量所測試的結果。圖 7 中其流道壁溫在引發相變化時降低的幅度大於 Peng 及 Wang [10] 所得實驗結果，這是因為 Peng 及 Wang 所測試的微流道之水力直徑，遠比本實驗所測試的試片為大。

圖 8 Chip 2 (水力直徑 221 μ m) 及圖 9 Chip 6 (水力直徑 134 μ m) 以不同流速進行測試，結果發現較大流速時引發臨界成核熱通量所需的流道壁溫較低，引發完全發展核沸騰後流道壁溫大幅下降的情形亦較為緩和。這是因為流速較大時，流體帶

走熱量的能力較強，因此在未引發核沸騰時，熱沉本身所儲存的熱能不似流速較小時那麼多，因此不會使流道壁溫上升過高。

圖 10 為熱對流係數與流道壁溫的關係圖，圖中很明顯的可以區分成三個區域，第一是單相流區域，中間則是過渡區域，最後則是相變化區域。在單相流區域時，熱對流係數隨著流道壁溫的增加呈現出些微上升的情形，因為流道壁溫與流體溫度增加的幅度相差不大，此時是屬於單純的強制對流區。過渡區域中熱對流係數明顯的隨著流道壁溫增

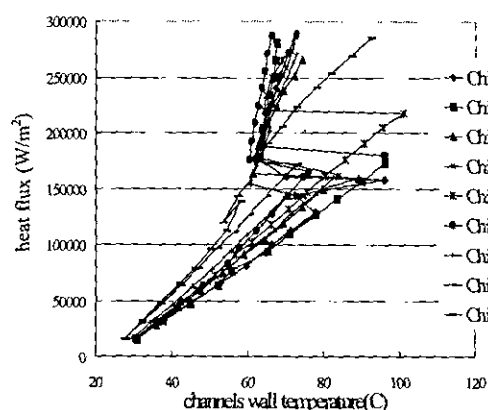


圖 7 各試片在相同壓差下，熱通量隨流道壁溫之變化

Fig. 7 The heat flux vs. channel-wall temperature of micro-channel heat sinks under the same pressure drop

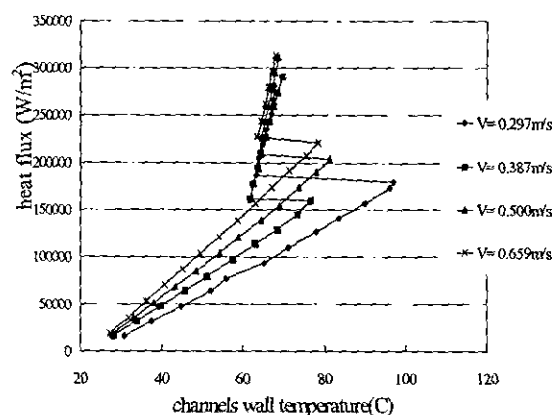


圖 8 Chip 2 (水力直徑 221 μ m) 在不同流速下，熱通量隨流道壁溫之變化

Fig. 8 The heat flux vs. channel-wall temperature of Chip 2, with the hydraulic diameter of 221 μ m, corresponding to different flowing speeds

加而下降，這是因為此時的加熱功率未達到足以讓流體引發沸騰的臨界成核熱通量，加上微流道尺寸的限制而無法產生部份核沸騰，使得雖然流道壁溫增加，但流體溫度保持不變所造成的結果。第三個區域為相變化區域，此時流體引發核沸騰，大量的潛熱降低了流道的壁溫，使得熱對流係數急遽上升。Chip 9 在此時熱對流係數反而下降，因為其流道壁溫上升較迅速，顯示在此時沒有核沸騰的現象發生。

綜合以上的實驗結果，可以發現 Chip 1 ~ 8 的測試結果，皆具有相變化之不連續特徵，而 Chip 9

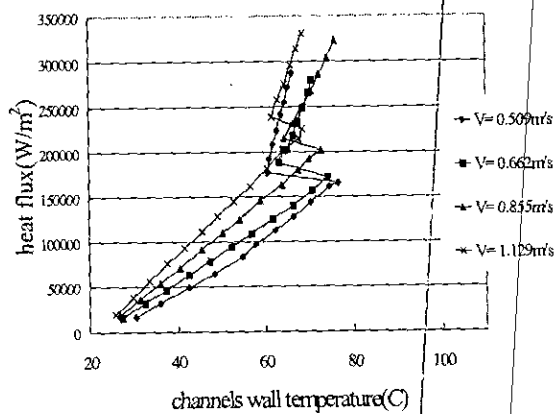


圖 9 Chip 6 (水利直徑 134 μ m) 在不同流速下，熱通量隨流道壁溫之變化

Fig. 9 The heat flux vs. channel-wall temperature of Chip 6, with the hydraulic diameter of 134 μ m, corresponding to different flowing speeds

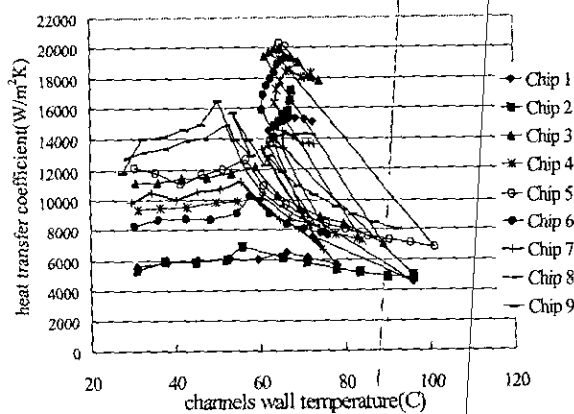


圖 10 各試片熱對流係數隨流道壁溫之變化

Fig. 10 The heat transfer coefficient vs. channel-wall temperature for micro-channel heat sinks

則獨樹一格：從流道壁溫沒有因相變化而明顯的下降，高流道壁溫時熱對流係數的下降，進出口壓力降沒有因強烈核沸騰而急遽上升等三種情形來看，Chip 8 與 Chip 9 之間存在著一個是否能發生核沸騰，亦即微小汽泡成核的臨界點！因此可以推測：甲醇的臨界汽泡尺寸位於 57 ~ 83 μ m 之間。此論點與 Peng 及 Wang [12] 所推論的結果有明顯的差別。

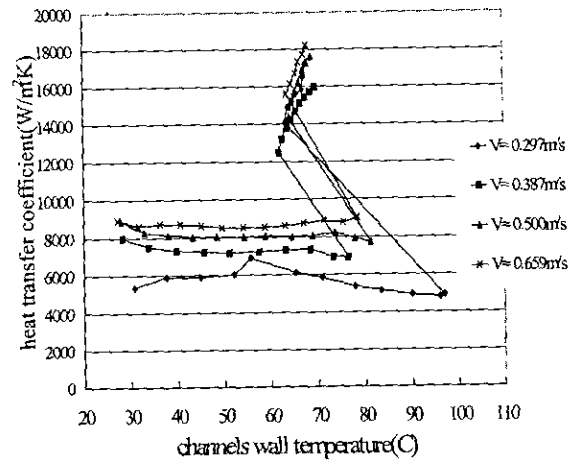


圖 11 Chip 2 (水利直徑 221 μ m) 在不同流速下，熱對流係數隨流道壁溫之變化

Fig. 11 The heat transfer coefficient vs. channel-wall temperature of Chip 2, with the hydraulic diameter of 221 μ m, corresponding to different flowing speeds

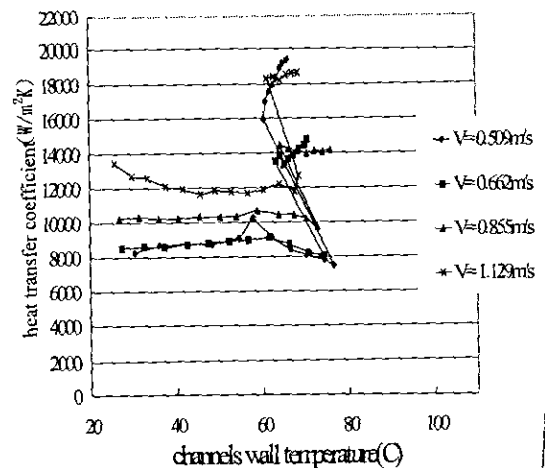


圖 12 Chip 6 (水利直徑 134 μ m) 在不同流速下，熱對流係數隨流道壁溫之變化

Fig. 12 The heat transfer coefficient vs. channel-wall temperature of Chip 6, with the hydraulic diameter of 134 μ m, corresponding to different flowing speeds

上述熱傳部分的實驗，著重在汽泡成核機制及相變化熱傳機制的探討，故在此視流觀察扮演了重要的角色：可以伴隨實驗數據解釋相關物理現象。首先在流體流經微流道一段時間後，流態趨於穩定，可以觀察到微流道內沒有混雜著氣泡及其他雜質通過，顯示了實驗設備之過濾器發揮效用，有利於判斷實驗中相變化時有無汽泡的生成，增加實驗的正確性。

當施加功率到達臨界成核熱通量後，流道內應開始有核沸騰的現象發生。前述實驗結果圖 7 ~ 圖 14 顯示，微流道水力直徑在 $83\mu\text{m}$ 以上時足以讓汽泡成核，但視流觀察卻無發現汽泡；直到使用水力直徑 $267\mu\text{m}$ 的微流道時，才因著配合了低流速的條件而生成汽泡被觀察到。本文此地的推測如下：在水力直徑 $83\mu\text{m}$ 到水力直徑 $267\mu\text{m}$ 之間，因為

流道內流體的流速過快，雖然所吸收的熱能得以成核，卻被快速的流體沖毀或帶走，以致汽泡核無法繼續成長。

以上相關論點及實驗結果與 Peng 及 Wang [11] 所提出的觀念「蒸發空間」有所差別，Peng 及 Wang 認為微流道中是否能夠生成汽泡受到流道水力直徑及加熱通量的大小所控制。本實驗經由視流觀察的結果卻發現，流道內流體的流速及壓力亦對汽泡成核生長有很大影響，亦即有足夠的能量空間生成汽泡，卻因為流體流速與壓力過大而消失！

2.6 結 論

本文第二部份以實驗的方式探討矽質微流道的基礎熱流現象，微流道水力直徑為 $57 \sim 267\mu\text{m}$ ，幾何形狀為梯形及三角形，工作流體為甲醇。探討的重點包括流體流經微流道時的摩擦問題，單相流及相變化時的熱傳性能，相變化時的成核機制等。

在流力特性方面主要以不同流速來探討摩擦因子與雷諾數間的關係，實驗結果顯示出流體在微流道中受到摩擦及黏滯係數的影響相較於大管明顯，亦即流體本身的物理性質、微流道的表面粗糙度及幾何形狀等，對於流力特性的影響較為顯著。

熱傳性能實驗中以甲醇為工作流體，通過不同幾何尺寸的微流道進行測試，測試結果發現微流道熱沉在相變化產生時，能快速吸收熱能並降低工作溫度。實驗數據結果並顯示：本文所採用的微流道，其水力直徑在 $83\mu\text{m}$ 以上時足以讓汽泡成核；但由視流觀察發現：以去離子水 (DI water) 及甲醇為工作流體時，在水力直徑 $83\mu\text{m}$ 到水力直徑 $267\mu\text{m}$ 之間，沒有汽泡產生，直到水力直徑 $267\mu\text{m}$ 以上的微流道，才配合低流速的條件下生成汽泡。綜合言之，微流道中汽泡的持續成長，不僅與水力直徑及施加熱通量大小有關，更必須配合低流速及低壓力降才能讓汽泡得以保存，才不致發生微小汽泡生成後來不及繼續成長而被強烈流速沖毀的情形。此結論為相關文獻作了補充。

3. 微熱管均熱片

3.1 緣由與目的

在各種傳熱系統中，熱管是目前所知最有效率的裝置之一。相較於其他傳統的方式，熱管具有下列的優勢：可在小的截面積與溫度差下，於極短的

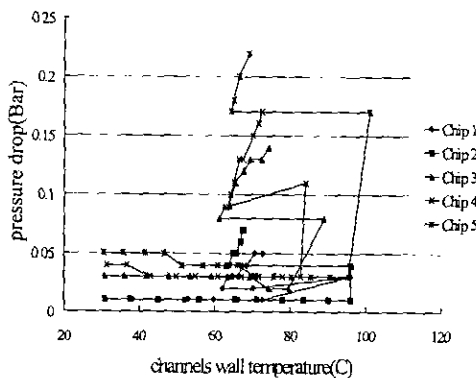


圖 13 前 5 試片壓力降對流道壁溫之變化

Fig. 13 The pressure drop across the micro-channel vs. channel-wall temperature for Chip 1 to Chip 5

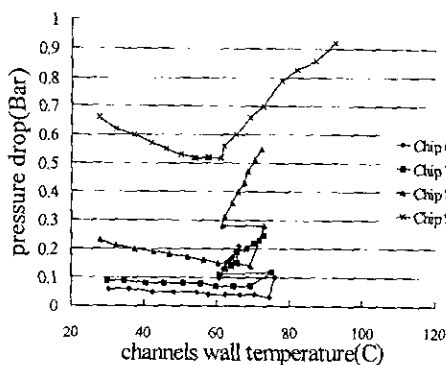


圖 14 後 4 試片壓力降對流道壁溫之變化

Fig. 14 The pressure drop across the micro-channel vs. channel-wall temperature for Chip 6 to Chip 9

時間將大量的熱傳送一段可觀的距離，並且不須外加功 (work)，此外，在不同範圍的溫度中，均可傳送高熱量的能力，更是熱管的獨特優點。因此，利用最進步的微熱管均熱片 (micro heat pipe spreader) 將晶片熱源均勻地擴散至熱管表面，再經由外加的熱沉將熱量散逸的方式，是現今可期待的解決方式之一。熱管利用內部工作流體的相變化 (phase change) 傳輸極高的熱量，其熱傳效能是一般強制空冷的 50 倍，因此可以大幅地提昇熱傳性能，而達到將晶片均溫的目的。

自 1984 年 T. P. Cotter [13] 提出微熱管的構想作為解決電子元件散熱之途徑後，有關微熱管之理論分析與實驗測試紛紛被提出。目前在矽質微熱管領域研究中，幾乎均為三角形流道構型配合 Corning #7740 玻璃接合的製作測試與相關理論分析推導 [14]，但此種構型能提供毛細作用的銳角數僅有三個，在工作流體的傳輸能力上稍嫌不足，加上 #7740 玻璃的熱傳性能不佳，因而導致微熱管的效能仍與小型傳統熱管相差甚遠。

本文提出新的設計與製程：在 4 吋 (100) 矽晶片上分別製作 1 平方英吋大小，具六角截面之星形微熱管與平板式微熱管，材質為單晶矽，如圖 15、16 所示，星形微熱管利用較多的銳角數來增加毛細作用之施展，如圖 17；平板式微熱管則是利用兩晶片之微小空隙與三角形凹槽，達到類似的目的，如圖 18 所示。

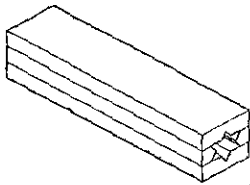


圖 15 六角星形微熱管示意

Fig. 15 The micro heat-pipe spreader with the cross section of "David's Star"

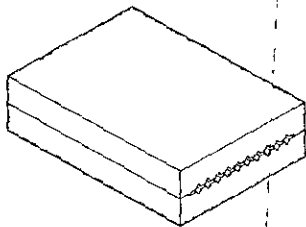


圖 16 平板式微熱管示意

Fig. 16 The micro heat-pipe spreader with the cross section of an ultra-narrow slit and tinny V-grooves

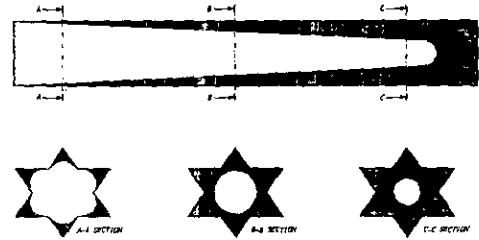


圖 17 六角星形微熱管作動示意

Fig. 17 The micro heat-pipe spreader of "David's Star" shape filled with working liquid and its operating schematic

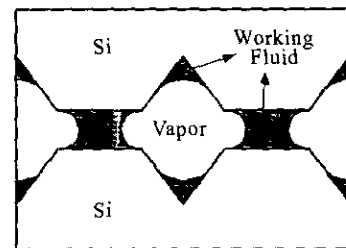


圖 18 平板式微熱管作動示意

Fig. 18 The ultra narrow slit-shaped micro heat-pipe spreader filled with working liquid and its operating schematic

3.2 製程與封裝

本文將個別說明星形微熱管與平板式微熱管之製程與封裝：

1. 星形微熱管

本文之矽質星形微熱管，也是利用光蝕微影與非等向性濕蝕刻，製作出矽質微流道凹槽後，再配合共晶接合 (eutectic bonding) 技術，將具凹槽之矽晶片接合成微管。所使用之矽晶片規格如表 2 所示，整體製程如圖 19 所示。

表 2 實驗矽晶片規格表

Table 2 The specification of silicon wafers using in this work

編號	晶片 1	晶片 2
晶片直徑	100 ± 0.5mm	100 ± 0.5mm
晶片厚度	525 ± 25μm	325 ± 25μm
晶片阻值	100 ~ 150ohm-cm	1 ~ 10 ohm-cm
晶片級別	Prime	Prime
表面情況	1-side Polished	2-side Polished

整體製程說明如下：

本文之星形微熱管是由三片矽晶片所組成，由於目前市面上可購得之雙拋 (100) 矽晶片，其厚度最薄為 325 μm ，因此流道寬度設計為 200 μm ，見圖 20，其中上下兩片使用同一光罩。光罩上繪製流道、抽氣充填用之充填口與流道、以及共晶接合對準用之四條凹槽；而中央夾層之晶片，因需利用雙面對準曝光機 (Karl-Suss double-side mask aligner) 進行蝕刻孔道圖形定義，故需使用兩片光罩，光罩上除了流道與接合用之對準凹槽外，尚有供雙面對準用記號 (align key)。光阻成型後，利用 BOE 將顯影後外露之氧化層去除。BOE 對 SiO_2 每

分鐘可蝕刻 880 ~ 1000 Å，氧化層去除結果可由純矽不沾水之現象加以觀察，若水會自晶片上迅速脫離，即代表氧化層去除完成，氧化層去除完成後以 DI-Water 沖淨，即可進行非等向性 KOH 蝕刻部份之製程。

由於非等向性蝕刻液對矽晶片各結晶面蝕刻速率不同，{100} 面蝕刻速率約為 {111} 面蝕刻速率之 100 ~ 400 倍，故能在 (100) 矽晶片上，蝕刻出夾角 54.7° 之 V 形或梯形凹槽，如圖 21。本實驗使用重量百分比 40% 之氫氧化鉀水溶液 (KOH : DI-Water = 2 : 3)，於溫度 80°C、攪拌子

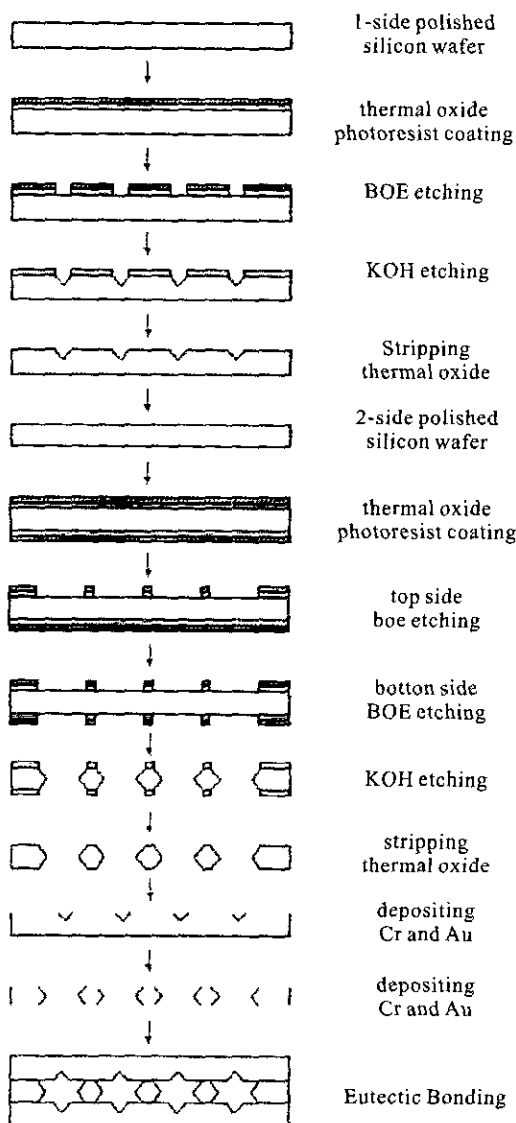


圖 19 六角星形微熱管製程流程

Fig. 19 The fabrication process of the "David's Star" shaped micro heat-pipe

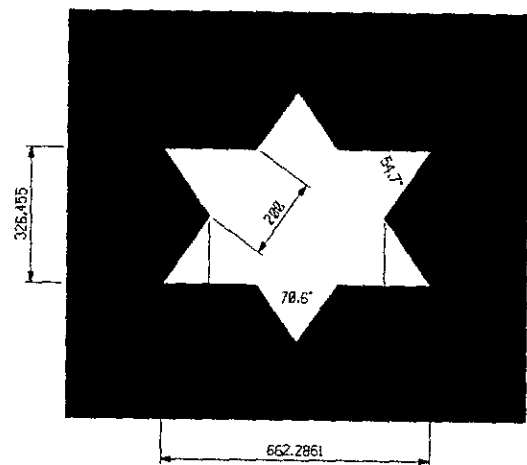


圖 20 微熱管細部尺寸與構成

Fig. 20 The sandwich structure and the dimensions of the "David's Star" shaped micro heat-pipe

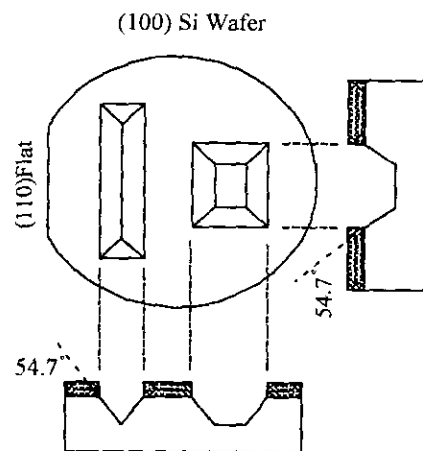


圖 21 (100) 矽晶片非等向性蝕刻凹槽幾何形狀示意

Fig. 21 The V-grooves, etched on (100) silicon wafers, by the anisotropic etching solutions

轉速 400rpm 的條件下進行蝕刻，可兼顧蝕刻速率與粗糙度，其蝕刻速率約為每分鐘 $1 \sim 1.2\mu\text{m}$ ，因此流道寬度為 $200\mu\text{m}$ 之上下兩部份晶片，其所需蝕刻深度約為 $141.4\mu\text{m}$ ，換算蝕刻時間約為 118 分鐘；而中央夾層之晶片，由於是雙面同時蝕刻，並將晶片蝕穿，所以其蝕刻深度為晶片厚度之半 ($162.5\mu\text{m}$)，蝕刻時間約為 136 分鐘。因為蝕刻速率會隨著蝕刻時間發生些許的變化，所以蝕刻完畢後，應將晶片置於顯微鏡下觀察，以確定蝕刻是否完成。

2. 平板式微熱管

本實驗中之平板式微熱管僅使用單一種類之矽晶片，即表 2 中「晶片 1」之厚度 $525\mu\text{m}$ 單拋矽晶片。其製程如圖 22 所示。光罩部分，平板式微熱管需要二片光罩，為了將來與星形微熱管做性能比較的緣故，其中一片光罩與星形微熱管的第一片光罩相同，所以其亦為寬度 $200\mu\text{m}$ 之 V 型流道凹槽，長 24.4mm 、凹槽彼此間距 $620\mu\text{m}$ ，共 31 條流道，同樣附有抽真空與充填用之開口與通道，以及接合對準所需之凹槽。另一片光罩則為一單純 $2.54\text{cm} \times 2.54\text{cm}$ 之四方窗。

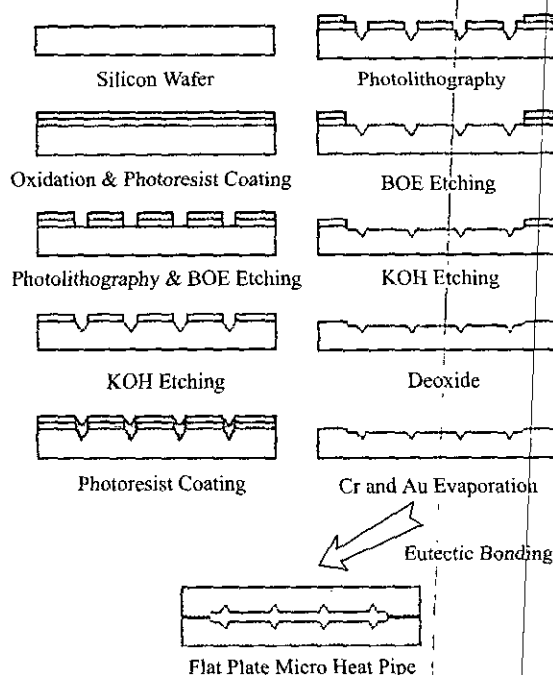


圖 22 平板式微熱管製程流程

Fig. 22 The fabrication process of ultra-narrow slit-shaped micro heat-pipe

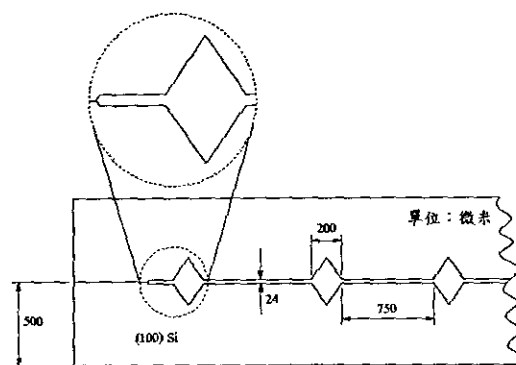


圖 23 平板式微熱管尺寸與構成

Fig. 23 The bonded structure and the dimensions of the ultra-narrow slit-shaped micro heat-pipe

3. 充填口之鑽孔

以往由玻璃與矽晶片結合而成之微熱管，其工作液體之充填大多自玻璃處開孔，而本文之二組微熱管，由於均由矽晶片組成，因此利用可撓性軸研磨機 (flexible shaft grinder)，於矽晶片上之充填口位置鑽一直徑約 1mm 之小孔，此即為微熱管之充填口，如圖 24。

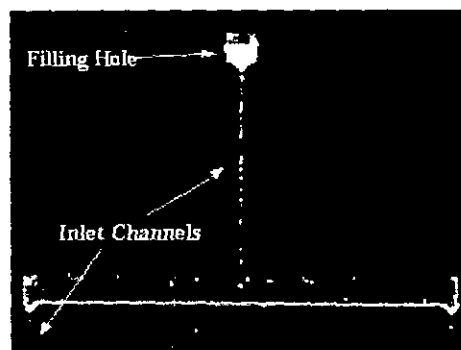


圖 24 充填孔之實體照片

Fig. 24 The filling holes of micro heat-pipes prepared to be filled with working fluid

4. 共晶接合

本文採用共晶接合 [15,16] 作為晶片接合之方法，先將晶片放入 BOE 中去除氧化層，再利用硫酸、雙氧水溶液 (3:1, Piranha) 清潔，並沖淨吹乾後，亦置入電子槍鍍膜機中，以 $5\text{\AA}/\text{sec}$ 及 $15\text{\AA}/\text{sec}$ 的鍍率，於晶片上分別蒸鍍上厚度為 75\AA 的鉻及 2000\AA 的金。有關接合前之對準，是利用先前光罩繪製時，預留於熱管流道四邊之長條狀接合對準窗，其將於曝光顯影及 KOH 蝕刻後，得到

四個 V 型凹槽，在對準時將光纖放入 V 形凹槽中作為卡榫，如圖 25 及圖 26 所示，即可達到對準之目的 [17]。將晶片兩兩對準放入真空腔中，於其上施予 $1.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 的壓力，腔體抽至高真空狀態，開始進行升溫接合之步驟。

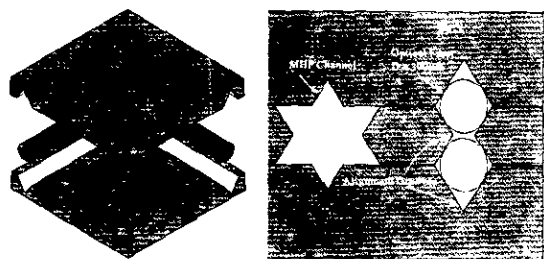


圖 25 光纖對準之示意

Fig. 25 The alignment method using optical fibers and V-grooves before the wafer bonding

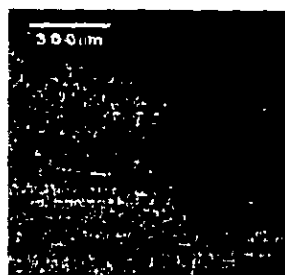


圖 26 光纖對準孔之實體照片

Fig. 26 The alignment grooves after the eutectic-diffusion bonding process

薄膜成長過程與星形微熱管相同，在曝光顯影製程中，首先使用星形微熱管的第一片光罩進行製程，曝光顯影與 KOH 蝕刻之參數與星形微熱管相同。完成後，再以具四方窗圖形之第二片光罩進行類似之製程。由於晶片已有蝕刻後之流道，呈規則之凹陷，不易塗敷均勻之光阻，因此要改變光蝕微影之製程參數。至於 KOH 的部分，只差在蝕刻時間不同：先前 $200\mu\text{m}$ 寬之 V 型槽蝕刻時間為 2 小時；第二次蝕刻時間則降為 10 分鐘，使每片晶片於所設計之區域與邊緣出現 10 至 $12\mu\text{m}$ 的落差，如圖 23 所示。

共晶接合後之結果如圖 27 所示，左圖為接合試片受壓區之邊緣，其雖亦完成接合，但尚可清晰地發現原本蒸鍍於晶片上之金，右圖則為受壓區內之部份，原本蒸鍍於晶片上之金幾乎已難以發現。圖 28 及圖 29 則分別為星形與平板式微熱管共晶接合後之剖面圖。

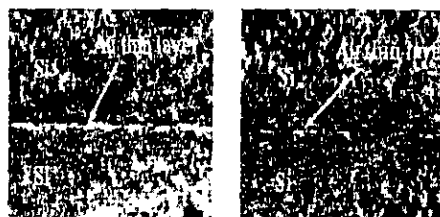


圖 27 共晶接合後試片之剖面照片

Fig. 27 The interface between two silicon wafers, coated with gold adhesion-layer, after the eutectic-diffusion bonding

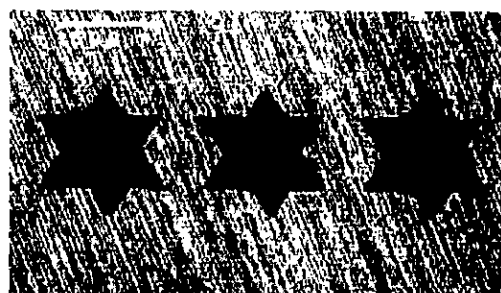


圖 28 共晶接合後之星形微熱管剖面照片

Fig. 28 The cross section view of the "David's Star" shaped micro heat-pipe after eutectic-diffusion bonding

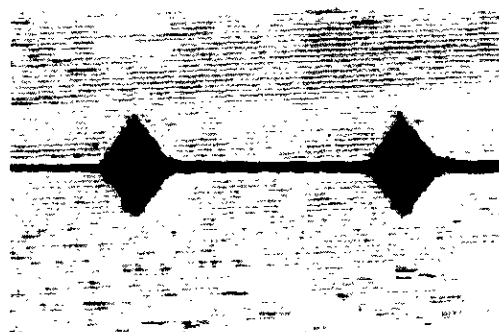


圖 29 共晶接合後之平板式微熱管剖面

Fig. 29 The cross section view of the ultra-narrow slit-shaped micro heat-pipe after eutectic-diffusion bonding

5. 脫氣與充填

本文中微熱管之脫氣封裝，大致上延續文獻[14]之儀器設備。在真空管路設計上，接近真空幫浦之管路使用較大的管路（直徑 25mm ），產生較高的抽真空效率，而其餘管路則使用較小的管路，管路末端靠近微熱管部份，其直徑僅有 1mm 。抽氣時，以 4mm 厚之矽膠墊片 (silicone packaging) 與微熱管緊貼，矽膠墊片有一通路通往直徑 1mm 真空管路，並於墊片與微熱管間塗覆一層高真空度之潤滑油脂 (high vacuum grease)，以避免抽真空與充填

時發生洩漏。注入工作液體時，將凝結區（具儲存槽端）放置下端，待真空度達 4.0×10^{-3} torr 以下時，移動矽膠墊片，切斷微熱管與真空管間通路，將注入器插入矽膠墊片與微熱管充填口交會處，並注入工作液體，如圖 30 所示。

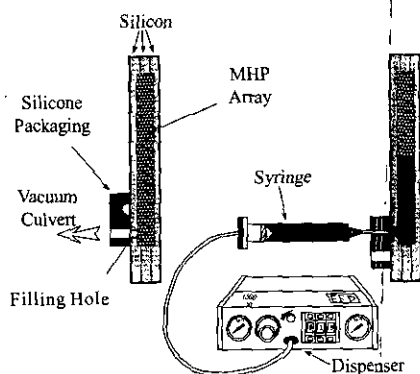


圖 30 工作液體充填示意

Fig. 30 The set-up for filling the working fluids of micro heat-pipes

本文中是採用 EFD 1500XL-C 氣壓式點膠機 (dispenser) 作為工作液體注入器，其利用壓力大小控制液體充填速率，並配合微電腦自動控制充填時間，兩者相搭配便可獲得所需之充填量。由於星形微熱管與平板式微熱管中流道容積分別約為 0.1623cm^3 及 0.038cm^3 ，而本文微熱管所用之工作液體為甲醇，其常溫下之比重為 $0.656\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ，因此可利用電子天平量測每單位時間充填液體之重量，並以調整充填速率，使其不致過大，再由比重換算體積，如此便可依所需充填量加以設定充填時間。

3.3 性能評價與測試

熱管被稱為「熱的超導體」，這是由於熱管的熱傳係數 (K_{eff}) 極高 (亦即代表熱管之熱阻極低)，在溫差很小的情況下，即可輸送大量的熱，因而熱傳導係數的高低，自然成為評判熱管性能優劣的標準。

為了解微熱管之熱傳性能，本文中使用 Fourier's law 與實驗測試相互配合，以計算微熱管之熱傳導係數如下：

$$K_{\text{eff}} = \frac{Q_{\text{in}}}{A_{\text{eff}} \Delta T_{\text{measured}}} \quad (6)$$

式(6)中 Q_{in} 為輸入之熱量， A_{eff} 為微熱管之截面積，

$\Delta T_{\text{measured}}$ 為蒸發段與凝結段兩者間量測溫度之平均溫差， L_{eff} 為蒸發段中點至凝結段中點之距離。

由式(6)中可得知，實驗量測之重點在於蒸發段與凝結段之溫度測量，並藉以獲得計算時所需之溫差 ($\Delta T_{\text{measured}}$)，因此，測試時將微熱管陣列放置於測試平台上，於蒸發段上下方各放置一 $6\text{mm} \times 25.4\text{mm}$ 之加熱電阻，以直流電源供應器控制加熱功率大小，而凝結段上下方則利用一 $6\text{mm} \times 25.4\text{mm}$ 之方形銅管，以抽水泵浦將恆溫槽中之冷卻水輸入管內，使用流量計控制冷卻水流量。

在溫度量測上，利用 OMB-1100 數據擷取系統與 K-type thermocouple 擷取微熱管上各量測點溫度，在蒸發段與凝結段上下則各黏貼 2 條熱電偶線，共 8 個熱電偶量測點。熱電偶線黏貼時，利用高熱傳導係數之矽膠膏 (silicone paste; Omega Omega-therm 201) 加以固定，以減低失真。熱電偶線量測所得之溫度，經由數據擷取系統與 RS-232 傳輸至個人電腦，藉以觀察及記錄微熱管各位置之溫度變化情況。整體實驗測試系統如圖 31 所示。

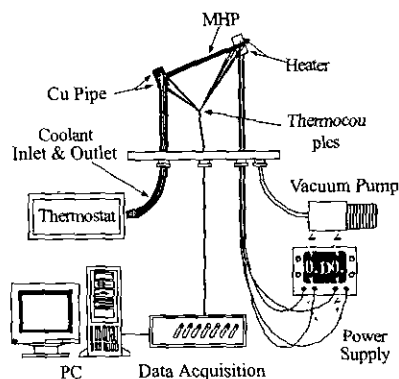


圖 31 微熱管性能測試系統示意

Fig. 31 The performance testing for micro heat-pipes

3.4 性能比較

本文利用星形與平板式微熱管與三角形微熱管 [14]，如圖 32，進行性能之比較；由圖 33 ~ 圖 36 知，僅有三個銳角提供毛細作用力的三角形流道微熱管，其效能可將矽晶片之熱傳係數，由原本的 153W/mK 提高至 208W/mK ，而星形微熱管與平板式微熱管因具有較高毛細管作用力，其最高之熱傳係數分別為 277.9W/mK 及 289.4W/mK ，見表 3。

在工作角度對星形流道微熱管之影響方面，於操作角度 90° 至 -90° 間熱傳導係數出現

17.6W/mK 的差異。工作角度對平板式微熱管之影響較星狀流道微熱管為小，熱傳導係數相差約僅 10W/mK，換言之，工作角度對微熱管熱傳導係數之影響約只有最高值之 3~4%。

3.5 結 論

利用雙面曝光技術、光纖對準、共晶接合技術於 (100) 晶片上製作星形流道微熱管及平板式微熱管，其結果均與原本之設計構思大致符合，星形流道微熱管於接合後，仍可保持六個角之尖銳度；而平板式微熱管，其兩晶片間之隙，亦達到設計要求。

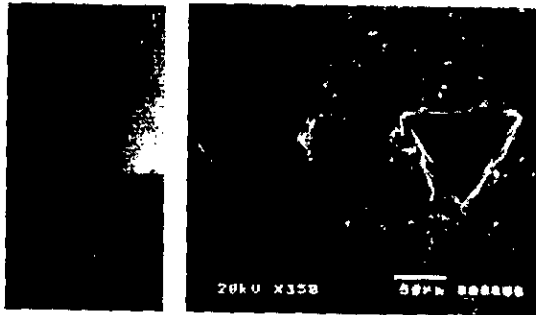


圖 32 文獻 [14] 矽質三角形流道微熱管

Fig. 32 The silicon delta-shaped micro heat-pipe in the reference [14]

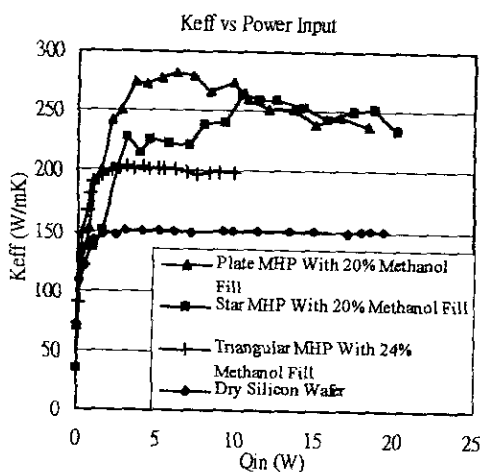


圖 33 相異幾何形狀微熱管裝填 20% 左右之熱傳導係數隨加熱量變化

Fig. 33 The thermal conductivity, of different heat-pipes filled with liquid of 20% volume, vs. the input heat power

經由測試結果得知，星形流道微熱管之較佳熱傳導係數為工作液體充填量 60% 時之 277.9W/mK，而作動區間則為 2.5W 至 11W；平板式微熱管之較佳熱傳導係數為工作液體充填量 80% 時之 289.4W/mK，作動區間在 2.5W 與 6.5W 之間。

在工作角度的影響上，本文中之星形流道微熱管與平板式微熱管，與以往相關之微熱管實驗結果相似，重力的因素約僅造成 3% 至 4% 之差異，而再次地強調出微熱管在各種工作角度操作性能變化不大的優點。

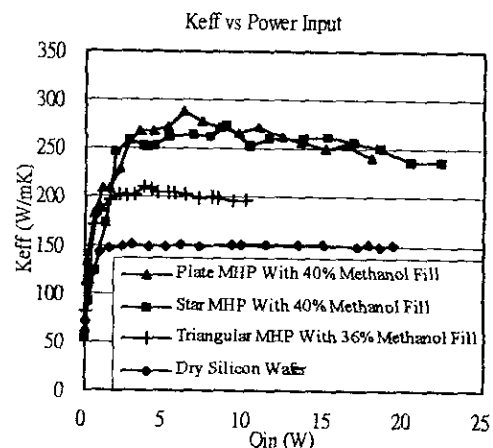


圖 34 相異幾何形狀微熱管裝填 40% 左右之熱傳導係數隨加熱量變化

Fig. 34 The thermal conductivity, of different heat-pipes filled with liquid of 40% volume, vs. the input heat power

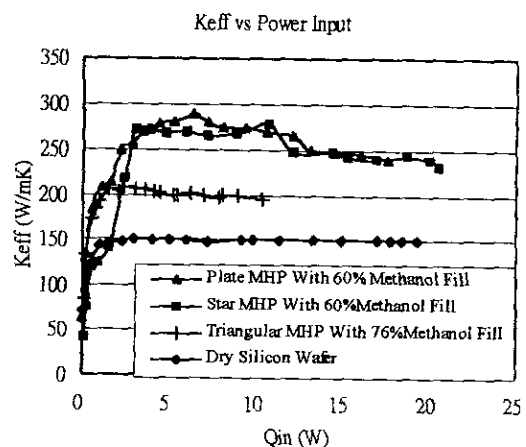


圖 35 相異幾何形狀微熱管裝填 60% 左右之熱傳導係數隨加熱量變化

Fig. 35 The thermal conductivity, of different heat-pipes filled with liquid of 60% volume, vs. the input heat power

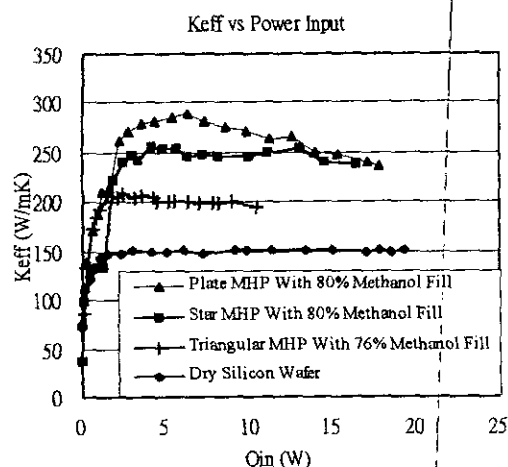


圖 36 相異幾何形狀微熱管裝填 80% 左右之熱傳導係數隨加熱量變化

Fig. 36 The thermal conductivity, of different heat-pipes filled with liquid of 80% volume, vs. the input heat power

表 3 相異幾何形狀微熱管之性能比較

Table 3 The performance comparison among different configurations of micro heat-pipes

相較點	文獻	文獻 [14]	本文	
			星形流道	平板式
製作基材		(100) Silicon Wafer & 7740 Glass	(100) Silicon	(100) Silicon
製作方式		Wet Bulk Etching & Anodic Bonding	Wet Bulk Etching & Eutectic Bonding	Wet Bulk Etching & Eutectic Bonding
微熱管陣列範圍		25.4 × 25.4 (mm ²)	25.4 × 25.4 (mm ²)	25.4 × 25.4 (mm ²)
微熱管流道凹槽寬		115μm	200μm	200μm
工作液體		甲醇	甲醇	甲醇
管壁厚		400μm	380μm	370μm
加熱區域		6 × 25.4 (mm)	6 × 25.4 (mm)	6 × 25.4 (mm)
冷卻方式		方形銅管 16.5 ± 0.3°C 冷水	方形銅管 19 ± 0.1°C 冷水	方形銅管 19 ± 0.1°C 冷水
測試環境		真空環境	大氣環境	大氣環境
測試之最佳熱傳導係數 (W/mK)		208 (70% Methanol Fill)	277.9 (60% Methanol Fill)	289.4 (80% Methanol Fill)

本文之微熱管雖然均由矽所組成，但卻避免掉以往矽質微熱管純矽不沾水之困擾，這是由於接合時所蒸鍍之黃金，其與水之沾濕性較矽為佳，因此也可使用水作為工作液體，而不會使毛細作用變差。

4. 微流道現地量測

4.1 原由與目的

單晶矽、玻璃、或塑膠材質之微流道，已經普遍地應用於生物醫學或高速冷卻之課題上。前者作為諸如毛細電泳式 (capillary electrophoresis) 質流分離之管路 [18]，後者則可應用於本文之微熱沉 [19] 或微熱管 [20] 之先導研究，二者之管道截面幾何尺寸約略在數十到數百微米之間。

雖然上述之應用研究早已多方展開，甚至有相關的產品問世，但是微小尺寸流力熱傳環繞在雷諾

數 10 到 2300 之間的基本問題，仍有待釐清 [21]。即便是本文第二部分之微流量量測，因只限於進口與出口之溫度與壓力量測，所得實驗數據之可信度，難免因局部不確定因素而顯得薄弱。正本清源之道，是將一陣列之微型感測器，整合入微流道之中，以便直接測知其中之壓力與溫度變化，而明微流道之小尺寸效應。圖 37 便是美國 UCLA 與 Caltech 最早製作出之微流道現地量測壓力晶片 [22]。

本文第四部分揭示一種新型玻璃載台，可將微感測器與微流道整合一體，一面進行微流道之應用實驗，一面現地監控 (on-site monitoring) 溫度與壓力變化，並提供未來微冷卻器，包括微熱沉與微熱管，之整體實地監測之需求。由於本微小研究載台允許較大範圍的微流道尺寸變動 (水利直徑可自數十微米變動至數百微米)，比起先前類似之文獻，具互補與實用之效。

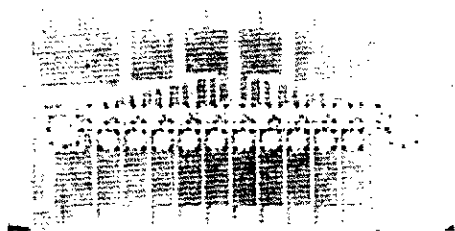


圖 37 現地量測微流道 (水利直徑：微米尺寸) 內壓力分佈之晶片 [22]

Fig. 37 The surface-micromachines chip with on-site micro sensors to measure the pressure distribution along a micro-channel with the hydraulic diameter of several micrometers proposed in reference [22]

4.2 實驗系統架構說明

本文提議之新型微感測器研究載台，如圖 38 所示。圖 38 上方是具有微流道溝槽結構之矽晶，其上同時蝕刻出凹槽，用以當作現地監控用微壓力計之通往微流道的空穴與引道。微溝槽或微流道之橫斷面，採體型加工製作，可為 (110) 矽晶圓上之矩形橫斷面流道或 (100) 矽晶圓上之三角形橫斷面流道，由於都是以非等向性濕蝕刻法所加工，微流道寬度或水利直徑可自數十微米變動到數百微米。

至於新型整合載台，係指圖 38 之下方 Corning #7740 玻璃基板部分。其上已經以所謂「semi-SOI (silicon-on-insulator)」的方式，事先在玻璃基板上製妥壓阻式微型壓力計，而具有量測壓力之能力。該壓力計之構型如圖 39 所示。製作程序請參見文獻 [24] 或 [25]。

Semi-SOI 壓力計晶片之製作，本為了大幅縮小體型加工之壓力計晶粒面積，或提高每片四吋晶圓之產量 (自一般 1000 顆提高到 4000 顆以上)，故圖 39 所示為單獨晶粒之外觀。若實地應用到圖 38 之整合載台，則無須將個別壓力計切割分開，而仍留在玻璃基板之上。至於基板上非指定用來作為壓力感測薄膜部位之矽膜，則全部去除、留下玻璃材質，以便未來整合封裝時，與另一片具有微溝槽結構之矽晶進行靜電鍵合。

玻璃基板上另需蒸鍍白金薄膜電阻，以及鋁質訊號導線，以賦予本整合載台量測溫度之功能。

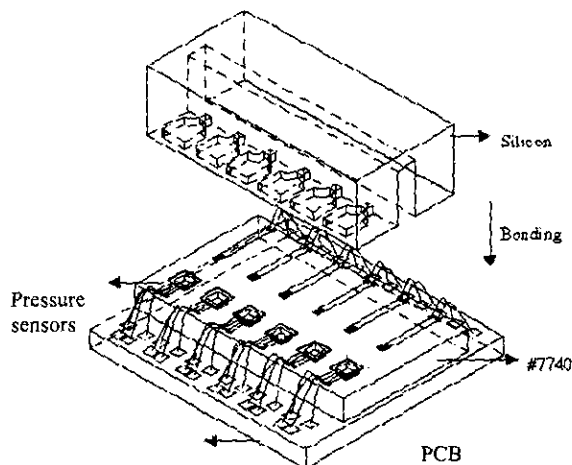
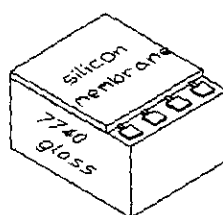


圖 38 新型「微感測器—微流道」之整合測試載台 [23]

Fig. 38 The new test chip with on-site sensors on the micro-channel (hydraulic diameter of 10 ~ 100 μ m) made by the silicon bulk micromachining



(a) 立體示意



(b) 原型壓力計 (尺寸：
1.0 × 0.8 × 0.5mm³)
完成晶粒切割
(dicing)、打線
(wire bonding)
後之外型

圖 39 semi-SOI 微型壓力計

Fig. 39 The “semi-SOI” micro pressure sensor prepared to be integrated into the test chip in Fig. 38; (a) the 3-D feature; (b) a sensor die after dicing and wire bonding

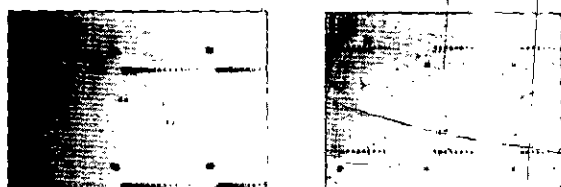
4.3 結果與討論

本整合載台概念雖不複雜，仍牽涉相當多之微細加工製程課題。相關的製程描述如下：

1. 微型壓力計之磊晶 (epi-taxial) 矽質薄膜 n⁻ 停止蝕刻：

以玻璃基板製作 semi-SOI 矽質微型壓力計的最後製程，亦即如何從一次靜電鍵合好的「玻璃基

板——500 微米厚的矽晶圓」，加工成「玻璃基板——15 微米厚的矽質薄膜」，在文獻 [24,25] 之中有詳細的描述。本文則試以「矽晶等向性腐蝕液」HNA (配方 $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{CH}_3\text{COOH}=1:3:8$)，配合雜質濃度在 $10\text{E}17\text{cm}^{-3}$ 以下之 n 型磊晶層 (成長於雜質濃度在 $10\text{E}18\text{cm}^{-3}$ 以上之 p 或 n 型矽晶圓)，希望蝕刻速度能減低為原來之 10% 或更少，達成近似停止蝕刻的效果，而得到厚度均勻之矽晶壓力薄膜。圖 40 為「矽晶—玻璃」複合晶片之試驗初步結果。腐蝕的前 30 分鐘，矽晶之蝕刻率約為每分鐘 1 微米；而 30 至 50 分鐘之間，平均蝕刻率則降至每分鐘 0.3 微米，顯示有停止蝕刻的效果。最後矽晶薄膜之厚度由 50 微米減薄至 14 微米。



(a) 自玻璃面觀察之景象，(b) 自受腐蝕矽晶面觀察之景象，黑點為 V 槽深度尺 [26]
平整度與均勻性良好，矽質薄膜厚度依據 V 槽深度尺判斷為 14 微米。

圖 40 以矽晶等向性腐蝕液 HNA 加工壓力計薄膜，並停止於 n 型矽質磊晶層之情形

Fig. 40 The surface view of a silicon wafer after HNA ($\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{CH}_3\text{COOH}=1:3:8$) etching with a low etch-rate on the light-doped epi-layer region: (a) the V-grooved depth-ruler (dark dots), monitoring the thickness of a silicon diaphragm, on the other surface of the wafer; (b) the view of the etched silicon surface

2. 壓力計引道進出口之凸角補償：

由於現地監測用壓力計必須與微流道相通，卻又不能影響原來之微流道流況過劇，所以引道進出口的寬度不能過大 (約為微流道寬之 10%，此地定為 15 微米；也遠大於流體之平均自由路徑；mean free path)。另外，若放任進出口的凸角被 KOH 腐蝕成具導角的外觀，也會嚴重影響下游流況，故需加上凸角補償 (convex corner compensation) 之技巧，以力求引道凸角 90° 之完整。補償圖形之蝕刻

波前以 (411) 面為基準 [27]，蝕刻補償之成果如圖 41 所示。

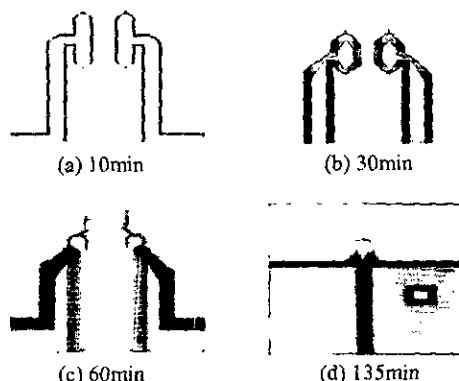


圖 41 樹枝狀的凸角補償初步結果，KOH 濃度 40%，溫度 80°C

Fig. 41 The convex corner, using the compensation of tree-fork patterns, subject to 40% KOH solution under the temperature of 80°C : (a) after 10min; (b) after 30min; (c) after 60min; (d) after 135min

3. 白金薄膜電阻之製備：

當作溫度感測器之白金薄膜電阻，係以電子束蒸鍍機 (E-beam evaporator) 鍍著，再以王水 ($\text{HCl}:\text{HNO}_3=1:3$) 蝕刻出電阻外型，如圖 42 所示。

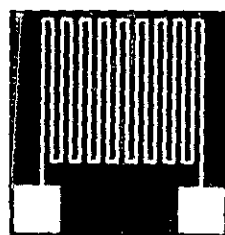


圖 42 白金薄膜電阻之外觀，大小 350 微米見方，電阻值約 1k 歐姆，量測溫度的靈敏度經校正約為 $2.5\ \Omega/^\circ\text{C}$

Fig. 42 The platinum (Pt) thin-film resistor, with $1\text{k}\Omega$ resistance and the sensitivity of $2.5\ \Omega/^\circ\text{C}$, prepared for measuring the temperature distribution along a micro-channel

4. 玻璃與矽晶之二次靜電鍵合：

由於玻璃與矽晶進行靜電鍵合時，玻璃中的鈉

離子會部分消耗，所以不能重複進行不限次數的鍵合。幸好本文只需兩次靜電鍵合，經過測試後（將已經鍵合之「玻璃-矽晶」複合片放入 KOH 中蝕去矽晶，再與另一片矽晶進行接合），尚未發現有無法鍵合的困難；唯鍵合強度尚未測定，無法得知是否有強度退化的現象。

另外，玻璃基板在經過多道微細加工的製程後，表面粗糙度 (Ra) 是否無法保持在 1.0 微米以下，而妨礙靜電鍵合之遂行，也需注意。

5. 結 論

目前整合晶片載台之製作，初步完成溫度陣列部分，壓力陣列之製作仍在進行之中。由於所有設計於載台上的微型感測器製程良率 (yield)，包括壓力與溫度感測器，都必須儘可能達到 100%，且每個微型感測器都要在事先經過壓力或溫度之校正，證明其量測之再現性後，本量測整合系統方能正式應用於微流道之現地量測。

圖 43 為白金溫度感測器陣列，初步量測三角 V 型截面微流道所得之溫度分佈。微流道寬度為 150 微米、長度 8000 微米。沿著微流道流動的方向，共擺置了 12 個白金電阻。圖中第九號白金電阻在封裝過程中失效，故該位置之溫度訊息闕如。本現地量測時加熱電阻功率固定於 0.33W，結果顯示，隨著雷諾數增加，微流道熱對流係數增加，故流道管壁溫度降低。每條溫度曲線在出口處有上升

反常之趨勢，初步解釋為微流道晶片加熱電阻設計不夠完美，加上出口處不是大氣壓力（離外界還有一段連接之歧管），造成在出口匯流處因擠塞不前，而繼續加熱造成再度升溫。

本整合量測系統本質上存在著以下問題：微型感測器因間距小，彼此訊號會干擾；尤其白金電阻在運作時會加熱微流道，一則影響微流道等熱通量之邊界條件；二來當此熱雜訊 (thermal noise) 傳至鄰近壓力感測器時，因壓電阻本身之半導體溫度效應極為敏感，壓力輸出訊號便需要進行溫度之補償，以確保量測之精準。上述訊號處理的問題，需要未來繼續進行現地量測時，進一步作精確的考量。

5. 總 結

本文就淡江大學微機電研究群近年在微型冷卻器課題之研究，包含微尺寸流道之流力熱傳特性與相變化機制，新型微熱管均熱片之製作測試，以及微流道內製作現地量測用微型感測器之初步成果，作一廣泛性之報告。連帶也介紹微機電製程技術之矽質體型微加工法與相關之接合技術。

微感測器因其本身尺寸微小的優點，極適合整合應用於生醫或冷卻微系統課題之現地量測，並可望近年內協助釐清次毫米至微米級之流力熱傳課題。未來若能進一步整合驅動微幫浦 (micro-pump)、微閥 (micro-valve) 與訊號處理電路 (post signal circuitry)，便能發展出更智慧化、功能更強大之微系統。當然，此意謂著必須有更多工程專長人員投入其中，彼此學習合作，方可竟其功 [28]。

誌 謝

感謝國科會對本研究群三年期「微冷卻器之整合計畫」之經費補助，計畫編號：NSC 88-2218-E-032-001 ~ 004；並感謝本研究群碩士研究助理黃德麟、蕭聰鑫、陳明正、楊賢政等人之協助執行本計畫，以及國科會北區微機電研究中心、國立交通大學半導體中心提供使用之製程設備。

參考文獻

- [1] D. B. Tuckerman and R. F. W. Pease, "High-Performance Heat Sinking for VLSI," *IEEE Electronic Device Letters*, Vol. EDL-2 (5), No. 4,

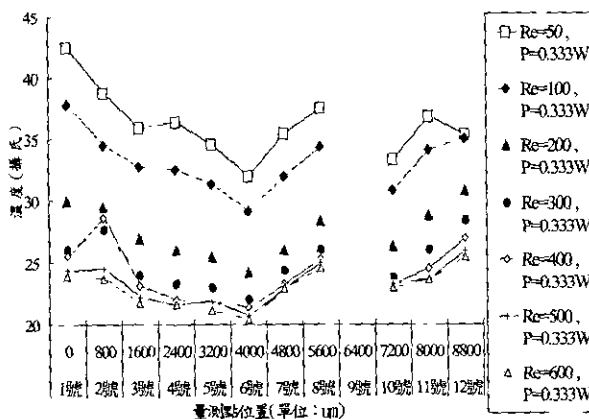


圖 43 白金溫度感測器陣列，初步量測三角 V 型截面微流道所得，自進口到出口之溫度分佈

Fig. 43 The temperature distribution, picked up by a rank of micro Pt resistors, revealing the variation along a delta-sectioned channel

- 1981, pp. 126-129.
- [2] W. J. Yang and N. L. Zhang, "Micro- and Mano-Scale Heat Transfer Phenomena Research Trends," *Transport Science and Technology*, 1992, pp. 1-15.
 - [3] G. P. Peterson and A. Ortega, "Thermal Control of Electronic Equipment and Devices," *Advances in Heat Transfer*, Vol. 17, 1990, pp. 181-314.
 - [4] J. Pfahler, J. Harley, H. H. Bau and J. Zemel, "Liquid Transport in Micron and Submicron Channels," *Sensors and Actuators*, A21-23, 1990, pp. 431-434.
 - [5] S. B. Choi, R. F. Barron and R. O. Warrington, "Liquid Flow and Heat Transfer in Microtubes," *ASME Micromechanical Sensors, Actuators and Systems*, DSC-Vol. 32, 1991, pp. 123-128.
 - [6] Weilin Qu, Mohiuddin Mafa, Dongqing Li, "Pressure-Driven Water Flows in Trapezoidal Silicon Microchannels," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, 1999, pp. 353-364.
 - [7] X. F. Peng and B. X. Wang, "Forced Convection and Flow Boiling Heat Transfer for Liquid Flowing through Microchannels," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 36, No. 14, 1993, pp. 3421-3427.
 - [8] B. X. Wang and X. F. Peng, "Experimental Investigation on Liquid Forced Convection Heat Transfer through Microchannels," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 37, Suppl. 1, 1994, pp. 73-82.
 - [9] X. F. Peng, G. P. Peterson and B. X. Wang, "Frictional Flow Characteristics of Water Flowing through Rectangular Microchannels," *Experimental Heat Transfer*, Vol. 7, 1994, pp. 249-264.
 - [10] X. F. Peng, G. P. Peterson and B. X. Wang, "Heat Transfer Characteristics of Water Flowing through Microchannels," *Experimental Heat Transfer*, Vol. 7, 1994, pp. 265-283.
 - [11] X. F. Peng, B. X. Wang, G. P. Peterson and H. B. Ma, "Experimental Investigation of Heat Transfer in Flat Plates with Rectangular Microchannels," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 38, No. 1, 1995, pp. 127-137.
 - [12] X. F. Peng and B. X. Wang, "Boiling Characteristics in Microchannels/Microstructures," *The 11th Int. Symposium on Transport Phenomena*, ISTP-11, No. 78, 1998, pp. 485-491.
 - [13] T. P. Cotter, "Principles and Prospects for Micro Heat Pipe," *Proc. 5th Int. Heat Pipe Conf.*, Tsukuba, Japan, 1984, pp. 328-335.
 - [14] 黃玉年、康尙文、黃德麟、楊龍杰,「矽質微熱管之研製與測試」,第十六屆中國機械工程學會全國學術研討會,中華民國十二月,1999,pp.411-418。
 - [15] Anders Hanneborg, "Silicon Wafer Bonding Techniques for Assembly of Micromechanical Elements," *Proceedings, IEEE Micro Electro Mechanical Systems Proceedings of the 1991 IEEE Micro Electro Mechanical Systems - MEMS '91*, 1991, pp. 92-98.
 - [16] A.-L. Tiensuu, J.-Å. Schweitz and S. Johansson, "In-situ Investigation of Precise High Strength Micro Assembly Using Au-Si Eutectic Bonding," *The 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, and Eurosensors IX*, 1995, pp. 236-239.
 - [17] S. E. Shoaf and A. D. Feinerman, "Aligned Au-Si Eutectic Bonding of Silicon Structures," *J. Vac. Sci. Technol.*, A 12(1), 1994, pp. 19-22.
 - [18] A. Manz, et al., "Planar Chips Technology for Miniaturization and Integration of Separation Techniques into Monitoring Systems," *J. Chromatogr.*, Vol. 593, 1992, pp. 253-258.
 - [19] C. R. Friedrich and S. D. Kang, "Micro Heat Exchangers Fabricated by Diamond Machining," *J. of Am. Soc. for Precision Engineering*, Vol. 16, No. 1, 1994, pp. 56-59.
 - [20] K. Mallik, et al., "Fabrication of Vapor-Deposited Micro Heat Pipe Arrays as an Integral Part of Semiconductor Devices," *J. of Micro-Electro-Mechanical Systems*, Vol. 4, No. 3, 1995, pp. 119-131.
 - [21] X. F. Peng and G. P. Peterson, "The Effect of Thermofluid and Geometrical Parameters on Convection of Liquid through Rectangular Microchannels," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 38, No. 4, 1995, pp. 755-758.
 - [22] J. Q. Liu, Y. C. Tai, K. C. Pong and C. M. Ho, "Micro-Machined channel/Pressure Sensor Systems for Micro Flow Studies," *Transducer '93*, 1993, pp. 995-997.
 - [23] L. J. Yang and S. W. Kang, "A Micro Fluidic System of Micro Channels with On-site Sensors by Bulk Micro-machining," *SPIE Symposium on Micromachining & Microfabrication*, Vol. 3877-37, 1999.
 - [24] L. J. Yang and Y. M. Chang, "A New Strategy to Reduce the Chip Size of the Bulk-Machined Micro-Sensors," *Proc. SENSOR 99* (Nuremberg, Germany), 1999, pp. 394-402.
 - [25] 「由矽晶體加工法製作之小型微壓力計及其製作方法」,發明人:楊龍杰、張益敏,中華民國專利公報,編號 390962,中華民國 89 年 5 月 21 日,2000。
 - [26] P. Z. Chang and L. J. Yang, "A Method Using V-Grooves to Monitor the Thickness of Silicon Membrane with um Resolution," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 8, No. 3, 1998, pp. 182-187.
 - [27] M. Bao, et al., "Etching Front Control of <110> Strips for Corner Compensation," *Sensors and Actuators A*, Vol. 37-38, 1993, pp. 727-732.
 - [28] 楊龍杰,「微小世界與微機械」,科學月刊,第三十卷第三期,三月號,1999,pp.190-197。



楊龍杰 (Lung-Jieh Yang) 1987 年國立成功大學航太工程學系學士，1991 年淡江大學機械工程研究所碩士，1997 年取得國立台灣大學應用力學研究所博士學位。現任淡江大學機械工程學系助理教授。研究專長為微機電系統技術、微感測器設計製作、以及微熱流量測等。



杜文謙 (Wen-Chien Duh) 1935 年生，日本慶應大學工學博士，目前任職私立淡江大學機械工程學系教授，曾任淡大機械工程研究所所長，研究興趣為機械設計、渦輪機及熱傳遞。



康尚文 (Shung-Wen Kang) 1958 年生，美國路易斯安那理工大學工學博士，目前任職淡江大學機械工程學系副教授，兼任淡大工程試驗組主任，研究興趣為微機電系統、微冷卻器。

CMOS microelectromechanical bandpass filters

Lung-Jieh Yang^a, Tsung-Wei Huang^{b,*}, Pei-Zen Chang^b

^aDepartment of Mechanical Engineering, Tamkang University, Tamsui 25137, Taiwan, ROC

^bInstitute of Applied Mechanics, National Taiwan University, Taipei 10617, Taiwan, ROC

Accepted 23 December 2000

Abstract

This work fabricates a laminated-suspension microelectromechanical filter, respectively, by a fully compatible CMOS 0.6 μm single poly triple metal (SPTM) process and CMOS 0.35 μm single poly quadri-metal (SPQM) process. Experimentally, due to the top metal layer being used as the etch-resistant mask during the subsequent dry etching. Therefore, this study performs maskless etching with plasma and obtains excellent results including high selectivity and full release of the structure. Additionally, the microelectromechanical filter can be driven by applying low-voltage of around 5 V and a measured center frequency of around 13.1 kHz and a quality factor of around 1871 were obtained for a single-comb resonator operated in air. The filter successful proposed herein has a monolithic integration capability with the relative electric circuits in the standard CMOS 0.35 μm process. © 2001 Elsevier Science B.V. All rights reserved.

Keywords: Microelectromechanical filter; CMOS; Maskless; Monolithic integration

1. Introduction

Accelerating developments in semiconductor fabrication technology have led to a new generation of microelectromechanical systems (MEMS), designed using microfabrication equipment and processing methods. Various fabrication technologies, including LIGA, CMOS-MEMS, surface and bulk micromachining, have been developed to fulfill various industrial requirements. Currently, many MEMS products, such as pressure sensors and accelerometers, have already been mass-produced. However, other products face lengthy delays before reaching the market place. What accounts for the difference pace of product development? We believe that monolithic integration, development time, and foundry services are the most important reasons for differing product development times. To fulfill these requirements, the conventional CMOS process is the best choice. Applying the standard CMOS process to MEMS has several merits.

First, the standard CMOS process can integrate micro-machined devices and operated circuits in monolithic chips. This integration not only reduces noise between devices and

circuits, but also simplifies the final packaging of chips. Second, standard CMOS process can reduce the development time of products. Third, many professional IC foundry services using the standard CMOS process aid customers in manufacturing their products. Particularly in Taiwan, certain foundry services such as Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC), United Microelectronics Corporation (UMC) can provide fast, mass, economic, repeatable and reliable fabrication.

Recently, MEMS has designed and fabricated resonant devices suitable for micromachined filters. In 1992, Tang et al. [1] developed an electrostatic comb drive levitation and control method. In their scheme, for compliant suspension, normal displacement of over 2 μm requires a comb bias of 30 V. Meanwhile, in 1997, Clark et al. [2] employed a polysilicon surface micromachining technology to build a parallel-resonator HF micromechanical bandpass filter. In their scheme, the center frequency is 14.5 MHz and filter Q ranges from 830 to 1600. Furthermore, in 1998, Lin et al. [3] used a polysilicon surface micromachining technology to construct a series-coupled resonator pair, design for operation at atmospheric pressure, with a measured center frequency of 18.7 kHz and a pass bandwidth of 1.2 kHz. Finally, in 1998, Wang et al. [4] used free-free beam, flexural-mode, micromechanical resonators to achieve measured Q 's as high as 8400 at VHF frequencies from 30 to 90 MHz.

*Corresponding author. Tel.: +886-2-23630979/ext. 433, 417;
 fax: +886-2-23639290.
 E-mail address: twhuang@meins.iam.ntu.edu.tw (T.-W. Huang).

2. Operating principle

2.1. Comb drive force in x -direction

The series filter concept has been implemented by using coupled electrostatically driven laminated-suspension resonant structures [5]. Fig. 1 shows the design layout of a single-comb resonator mechanical filter by the standard CMOS 0.6 μm (single poly triple metal) process. The input and output electrostatic combs function as linear electro-mechanical transducers provided they are biased at a dc voltage which is larger than the amplitude of the signal voltage (Drive Port). General analytic equations for the lateral comb drive force, F_x , as a function of comb finger width, w_c , air gap between comb fingers, g , structure thickness, t , and sacrificial spacer thickness, d , are derived by the expression [6]

$$F_x \cong 1.12\epsilon_0 N \frac{t}{g} V^2$$

where ϵ_0 is the permittivity of air, N the number of fingers in the movable comb drive, V the instantaneous voltage applied across the comb drive.

To increase comb drive force in the x -direction, the thickness of this mechanical resonator was increased. The five layers above the p -type silicon substrate are Poly, Metal 1, Metal 2, Metal 3 and Metal 4. Figs. 2 and 3 depict the design of Q -control scheme for a multi-port microresonator [7] and structural configuration of CMOS 0.35 μm (single poly quadri-metal) process, respectively. Herein, CONT (connect poly and Metal 1), VIA 1 (connect Metals 1 and 2), VIA 2 (connect Metals 2 and 3), VIA 3 (connect Metals 3 and 4) are also used as sidewall electrodes for the fixed electrodes. Metals 1, 2, 3, and 4, VIA 1, VIA 2, VIA 3 and CONT are alloys of aluminum, silicon and copper.

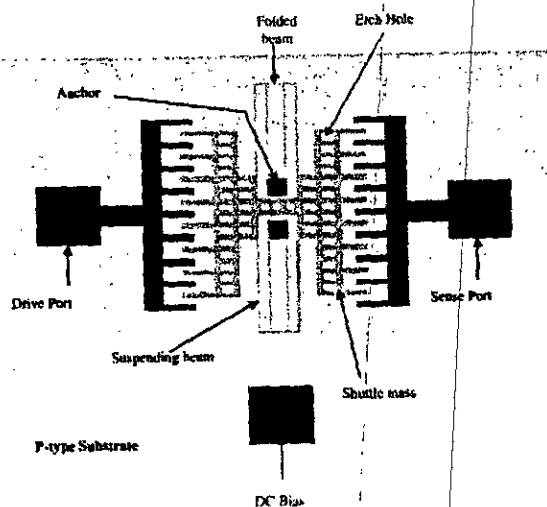


Fig. 1. Layout of a single-comb resonator mechanical filter.

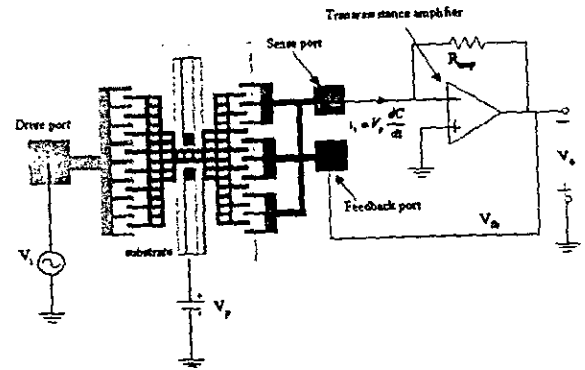


Fig. 2. Q -control schematic for a multi-port microresonator.

Compared to the fixed electrodes, the movable ones have a thin oxide layer in which p plus ion is implanted instead of the polysilicon layer. Therefore, Metal 1 and substrate are short circuited via the layout of the CONT layer.

2.2. Theoretical resonance frequency

The fundamental resonance frequency of this mechanical resonator is, again, determined largely by material properties and by geometry, and is given by the expression [8]

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2Eh(W/L)^3}{M_p + M_t/4 + 12M_b/35}}$$

where M_p is the mass of shuttle, M_t the mass of the folding trusses, M_b the total mass of the suspending beams, W and h are the cross-sectional width and thickness, and E the Young's modulus.

For this resonator design, a laminated-suspension structure with a thickness of approximately 5.005 μm . The folded suspensions are 1.5 μm wide beam lengths are 150 μm , finger widths are 2.5 μm , number of fingers is 26 and Young's modulus is $72.944 \times 10^9 \text{ N/m}^2$. According to geometric symmetry, we can easily obtain the shuttle mass is $307.820 \times 10^{-12} \text{ kg}$, the mass of the folding trusses is $7.930 \times 10^{-12} \text{ kg}$, the total mass of the suspending beams is $56.896 \times 10^{-12} \text{ kg}$. Therefore, at last, a typical theoretical center frequency for a 11.303 kHz folded-beam comb-driven micromechanical resonator was attained.

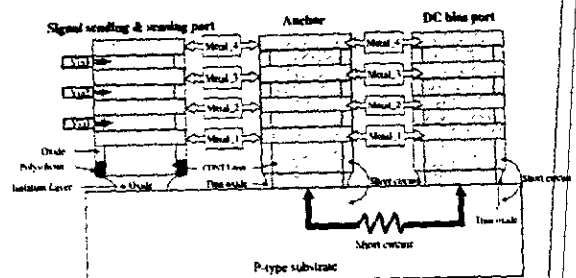


Fig. 3. Profile of high-aspect-ratio laminated microstructures.

3. Fabrication

The micromechanical filters are constructed using the CMOS 0.6 μm single poly triple metal (SPTM) and CMOS 0.35 μm single poly quadri-metal (SPQM) process available from TSMC. The process flow in Fig. 4 illustrates development of laminated-suspension microstructures in cross section. Fig. 4(a) presents the schematic cross-section view after TSMC processing. All the passivation nitride is already removed and the top metal layer is exposed. Therefore, the top metal layer is used as the etch-resistant mask during the subsequent dry etching steps that create the laminated microstructure. Without wet chemical etching, sticking occurs rarely and laminated-suspension microstructures are achieved. Fig. 4(b) illustrates the anisotropic oxide etching through to the silicon substrate by CF_4/O_2 reactive ion etching (RIE). Meanwhile, Fig. 4(c) displays the silicon substrate etching that releases the whole structure. By employing the large undercut of SF_6 RIE, 2.5 μm width of the beam could be released within 15 min via plasma etching.

The ratio of CF_4 and O_2 is the decisional recipe when CF_4 and O_2 RIE are applied to etch oxide or silicon substrate anisotropically. According to Jansen's Black Silicon method [9], using only SF_6 RIE to etch silicon substrate isotropically is the optimum choice. Fig. 5 shows a scanning

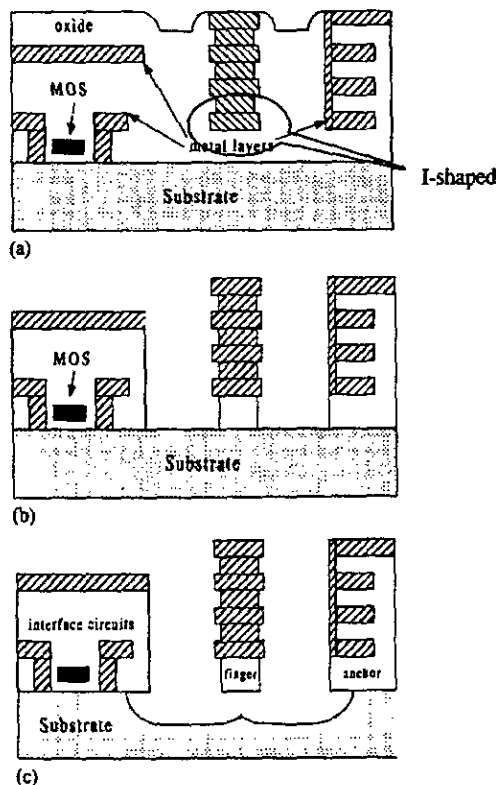


Fig. 4. Post-processing of microresonator: (a) after TSMC processing; (b) anisotropic oxide etching; (c) isotropic silicon etching.

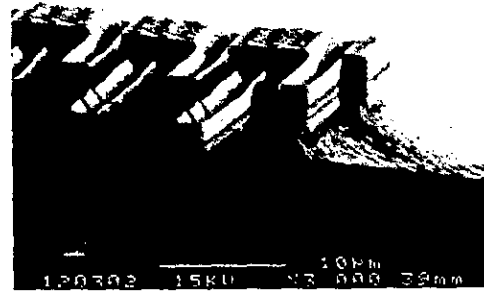


Fig. 5. SEM of the laminated-suspension microstructure.

electron micrograph (SEM) of the laminated-suspension microstructures.

4. Results and discussion

Fig. 6 displays a SEM of the released microstructures. After the structure is fully released, the resonator could be driven obviously around 5 V. Fig. 7 shows the SEM of circuits and microresonator monolithic integrate into a chip. Fig. 7(a) depicts using photoresist to protect the circuits during the plasma etching. On the other hand, the circuits have been made under Metal 3 layer to avoid destruction by dry etching (RIE) as shown in Fig. 7(b).

The sense current is passed through a transresistance amplifier and the output spectrum is observed on a spectrum analyzer. For a single-comb resonator operated in air, the measured center frequency is 13.1 kHz, which approaches the theoretical center frequency, indicating a quality factor of 1871 and an effective 3 dB-down bandwidth of 7 Hz when R_{amp} was 1 $\text{M}\Omega$. Under varying values R_{amp} of transresistance amplifier, different results can also be obtained on the side, as shown in Fig. 8.

The aluminum layers are too thin for this process. To increase the thickness of the fingers, VIA1, VIA2 and CONT

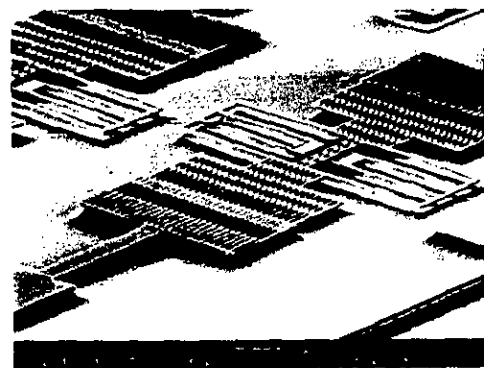


Fig. 6. SEM of the released microstructures.

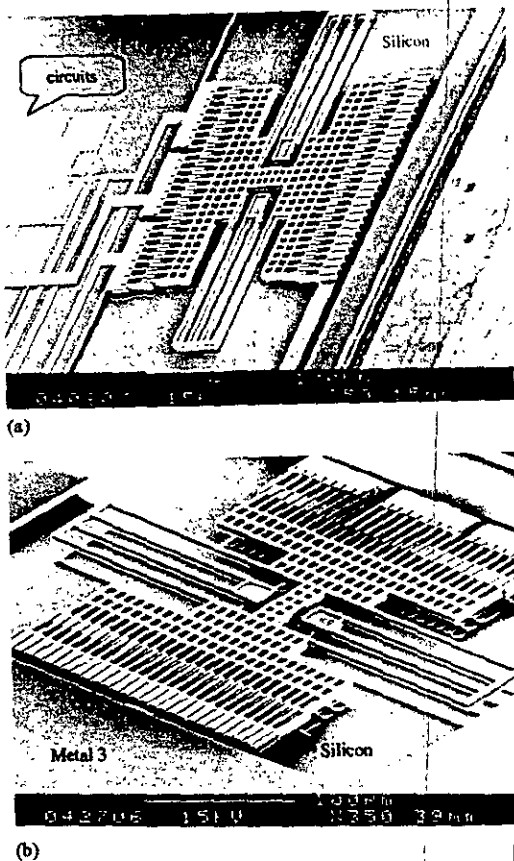


Fig. 7. SEM of circuits and microresonator monolithically integrated into a chip: (a) using photoresist to protect the circuits; (b) the circuits have been made under Metal 3 layer.

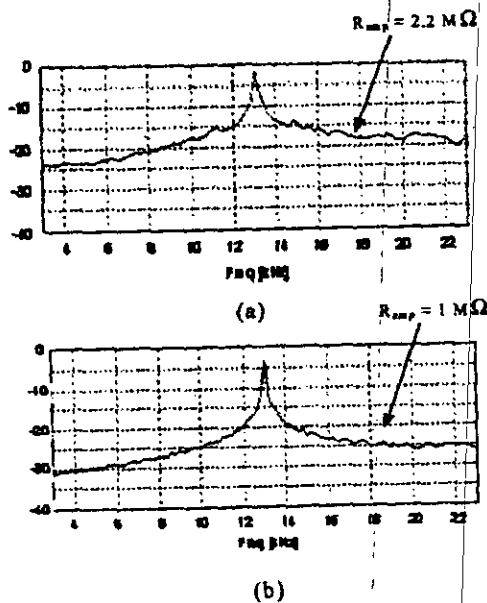


Fig. 8. Experimental measurement of a single-comb resonator operated in air.

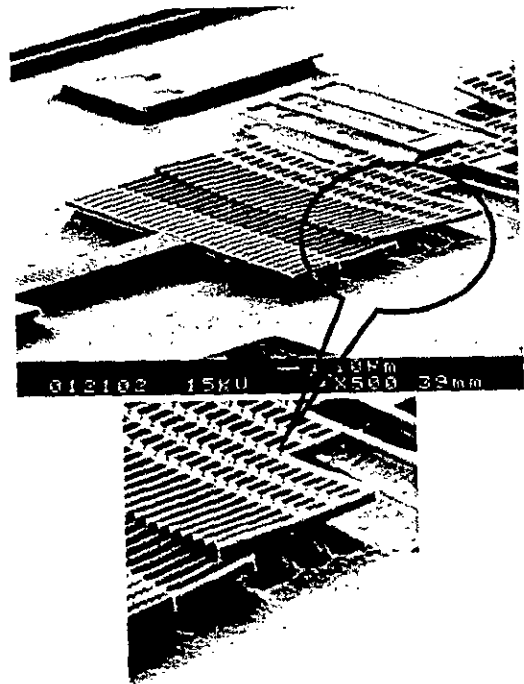


Fig. 9. The free end of comb fingers would bend out-of-plane after being released.

layers were used to connect Poly, Metal 1, 2 and 3. Using the VIA to connect each metal layer not only expands the electrode, but also protects the comb structure from the plasma etching. However, with the rugged surface caused by the VIA. The free end of comb fingers would bend out-of-plane following release as shown in Fig. 9. But this case occurs rarely here because design of I-shape structure and single material (alloys of aluminum, silicon and copper). To increase the stiffness of the comb structure, we try to turn it into I-shaped structure as shown in Fig. 4(a). The VIA layer must be smaller than the metal layer in order to meet the design rule of TSMC. Then we repeat this process to form a laminated comb structure.

5. Conclusion

This investigation fabricates laminated-suspension micro-machined filters by a fully compatible CMOS process. Experimentally, due to the top metal layer being used as the etch-resistant mask during the subsequent dry etching. Therefore, this study performs maskless etching with plasma and obtains excellent results, including high selectivity and full release of the structure. Finally, the micromechanical filter could be driven by applying a low-voltage of around 5 V, and has a measured center frequency of 13.1 kHz and a quality factor of around 1871. Due to the standard CMOS process, the micromechanical bandpass filter can easily be integrated with the relative electric circuits. In particular,



Phase synchronization of micro-mirror arrays using elastic linkages

Lung-Jieh Yang^{a,*}, Chih-Wei Liu^b, Peizen Chang^b

^aDepartment of Mechanical Engineering, Tamkang University, 151, Yih-Chan Rd, Tamsui 25137, Taiwan, ROC

^bInstitute of Applied Mechanics, National Taiwan University, Taipei 10617, Taiwan, ROC

Accepted 7 August 2001

Abstract

This paper investigates phase synchronization and concordant resonance of micro-mirror arrays and describes in detail a proposed design for a segmented micro-mirror with elastic linkages. The device replaces a conventional large area mirror, thus increasing the working frequency and allowing micro-mirror arrays to induce smaller vibration amplitude. The torsional micro-mirror array is fabricated using three conventional masks based on silicon bulk-micromachining technology. Experimental results of the prototype sample show that the phase difference among the mirror segments of the mirror array is below 1/15 cycle. © 2001 Published by Elsevier Science B.V.

Keywords: Micro-mirror array; Phase synchronization; Bulk-micromachining; Linkages

1. Introduction

Recently, silicon micromachining technologies have been widely used in the fabrication of smart devices in the field of microelectromechanical systems (MEMS). Included in the subset of micro-optical devices are micromachined mirrors. Micromachined mirrors have received an increasing attention not only for the potential in mass production but also for the merit of size-miniaturization. Taking the example of mirror applications to spatial light modulators in printers and optical scanners, the vibrating frequency and the amplitude of traditional scanning mirrors are constrained to substantially limited ranges. Using the configuration of micro-mirror arrays subjected to similar power consumption could effectively increase the resonant frequency and decrease the vibrating amplitude due to the greatly reduced size of the mirror plates.

However, the mirror arrays have an intrinsic drawback of non-synchronization of the phase-difference for each mirror plate. This out-of-phase issue cannot be solved by merely tuning the dimensions of the single torsion support [1,2]. This paper proposes a novel idea for the implementation of in-phase oscillation of micro-mirror arrays, augmenting the supporting configuration with a new mechanism of elastic linkages. Such mirror structures are fabricated using anisotropic wet etching on {1 0 0} silicon wafers. The proposed design mechanism is described in detail below.

2. Operational principles

This paper focuses mainly on the concept that a segmented mirror array is capable of replacing a whole sheet of mirror with the same area shown in Fig. 1(a) and (b). In-phase vibration of the segmented mirror array ensures that it has the same reflective efficiency as the whole mirror. However, an intrinsic drawback of this single design is the phase non-synchronization of each micro-mirror plate [3]. Tuning the dimensions of the torsional support does not resolve this issue. This work proposes a new segmented mirror design, which centers on a coupled micro-mirror structure with elastic linkages.

In this new mirror array configuration of Fig. 2(a), all the elements of the elastic linkages are described in the following. Each vibration mirror plate, with a polar moment of inertia, m , is connected to the frame edge by a torsional spring with two parts. The first part is called the "torsional spring", which is from the frame to the coupled joint with an equivalent spring constant, k . The second part is called "another torsional spring" from the coupled joint to the mirror plate with a spring constant, αk . The coupled joint also spans across two mirror sets with two-part "coupled beam", each with a spring constant, βk . All these elastic linkages of the mirror array can be modeled using a simplified mechanical vibration system as illustrated in Fig. 2(b) and can be regarded as a system with mass-damping-spring (MDS) [4,5].

Adding the "constrained spring" (with spring constant, γk) in the middle of coupled beam, just fixing the center of

* Corresponding author. Tel.: +886-2-26215656/ext. 2768;
fax: +886-2-26209745.
E-mail address: ljyang@mail.tku.edu.tw (L.-J. Yang).

micromechanical filters needed to extend their frequencies into the high VHF and UHF ranges are anticipated for all RF MEMS components.

Acknowledgements

The authors would like to thank JingHung Chiou, Kaihsiang Yen, Chiyuan Lee, Fuyuan Xiao, Hunglin Chen, Huiwen Huang of the Institute of Applied Mechanics, National Taiwan University, for their valuable assistance in the experiment, and the National Chip Implementation Center is also appreciated for their foundry support. In addition, we are grateful for discussions with Sujen Ji of the Advanced Instrumentation Center, National Taiwan University.

References

- [1] W.C. Tang, M.G. Lim, R.T. Howe, Electrostatic comb drive levitation and control method, *J. Microelectromech. Syst.* 1 (4) (1992) 170–178.
- [2] J.R. Clark, F.D. Bannon III, A.-C. Wong, C.T.-C. Nguyen, Parallel-resonator HF micromechanical bandpass filters, *Transducer* 97 (1997) 1161–1164.
- [3] L. Lin, R.T. Howe, A.P. Pisano, Microelectromechanical filters for signal processing, *J. Microelectromech. Syst.* 7 (3) (1998) 28–294.
- [4] K. Wang, Y. Yu, A.-C. Wong, C.T.-C. Nguyen, VHF Free-Free Beam High-Q Micromechanical Resonators, *J. Microelectromech. Syst.* 9 (3) (2000) 347–360.
- [5] L. Lin, C.T.-C. Nguyen, R.T. Howe, A. P. Pisano, Microelectromechanical Signal Processor, US Patent 5455547 (1995).
- [6] W.A. Johnson, L.K. Wame, Electrophysics of micromechanical comb actuators, *J. Microelectromech. Syst.* 4 (1) (1995) 49–59.
- [7] C.T.-C. Nguyen, R.T. Howe, Quality factor control for micromechanical resonators, *IEDM* (1992) 505–508.
- [8] W.C. Tang, T.-C. Nguyen, R.T. Howe, Lateral driven polysilicon resonator microstructures, *Sens. Actuators* 20 (1989) 25–32.
- [9] H. Jasen, H. Gardeniers, M. de Boer, M. Elwenspoek, J. Fluitman, A survey on the reactive ion etching of silicon in microtechnology, *J. Microelectromech. Syst.* (1996) 14–28.

Biographies

Lung-Jieh Yang received his MS degree from Tamkang University, Taiwan in 1991 and PhD degree from the Institute of Applied Mechanics of National Taiwan University, Taiwan in 1997. He is currently an Assistant Professor at the Department of Mechanical Engineering of Tamkang University with the research interests on micro-scaled fluid dynamics and microsensors technologies.

Tsung-Wei Huang was born in 1973 in Taipei, Taiwan. He received his BS degree in the department of agricultural machinery engineering from National Chung-Hsing University, Taiwan, in 1998. He is working toward his MS in the Institute of Applied Mechanics, National Taiwan University.

Pei-Zen Chang was born in Chia-Yi, Taiwan, ROC, in 1962. He received the BS degree in civil engineering from National Taiwan University, Taipei, Taiwan, in 1984, and the PhD degree in theoretical and applied mechanics from Cornell University, Ithaca, NY, in 1991. His PhD dissertation was about the mechanics of superconducting magnetic bearings. He joined the faculty of Institute of Applied Mechanics, National Taiwan University in 1991 and became a professor in 1999. His current research interests are in the area of micromachined sensors and actuators.

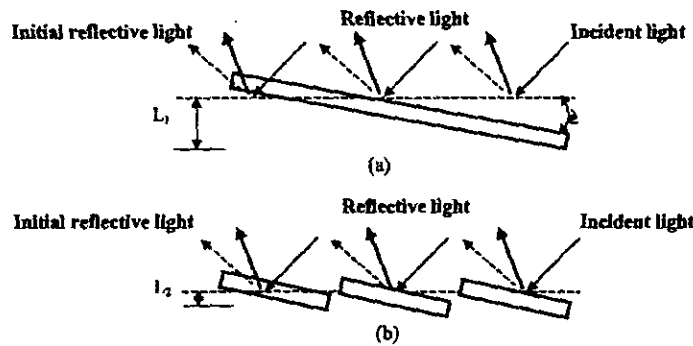


Fig. 1. Comparison of the designs of reflection mirrors. (a) A large deflection L_1 induced by the traditional mirror plate; (b) A smaller deflection L_2 induced by the mirror array.

the coupled beam as a nodal point with less freedom of movement, enforces the array structure to induce the in-phase vibration much more easily, as shown in Fig. 3. By adjusting the stiffness parameters (α , β and γ) of the elastic linkages mentioned above, the dimensions of microstructures and coupling strength could be optimized and determined.

According to Newton's Second Law, the equations of rotational motion for all the mirror segments are

as follows:

$$\begin{cases} m\ddot{x}_1 + c\dot{x}_1\alpha k(x_1 - y_1) = 0 \\ m\ddot{x}_2 + c\dot{x}_2\alpha k(x_2 - y_2) = 0 \\ \vdots \\ m\ddot{x}_n + c\dot{x}_n\alpha k(x_n - y_n) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

where x_i is the rotational displacement (angle) of mirror segment i from its equilibrium position. Assume that,

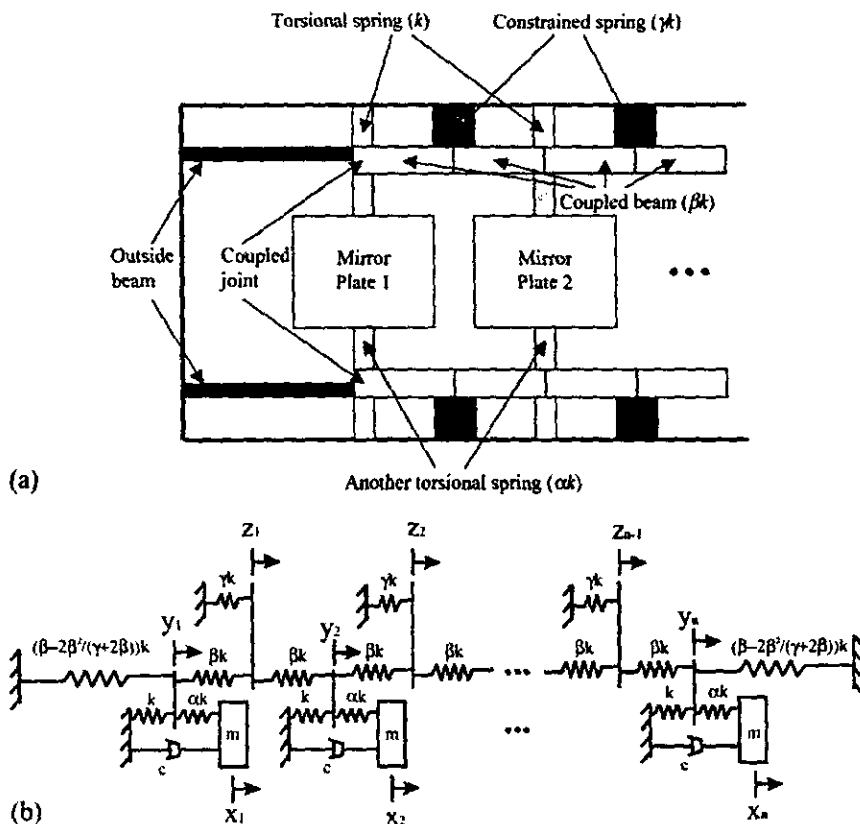


Fig. 2. The schematics of the new micro-mirror array. (a) The structure; (b) The mechanical (MDS) model.

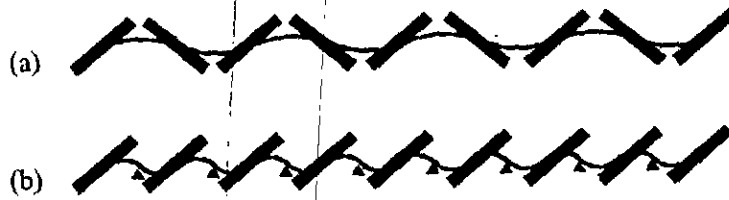


Fig. 3. Comparison of an unsupported mirror array with the design of constrained springs. (a) Without constrained springs; (b) With constrained springs.

87 according to Fig. 2(b), the rotational displacements y_1, \dots, y_n
 88 and z_1, \dots, z_n on each node are moved without mass. Applying
 89 the equations of force equilibrium allows us to obtain the
 90 relationship among these three sets of coordinates.

$$\begin{cases} ky_1 = \alpha k(x_1 - y_1) + \beta k(z_1 - y_1) \\ ky_2 + \beta k(y_2 - z_1) = \alpha k(x_2 - y_2) + \beta k(z_2 - y_2) \\ \vdots \\ ky_n + \beta k(y_n - z_{n-1}) = \alpha k(x_n - y_n) + \beta k(z_n - y_n) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \gamma kz_1 + \beta k(z_1 - y_1) = \beta k(y_2 - z_1) \\ \gamma kz_2 + \beta k(z_2 - y_2) = \beta k(y_3 - z_2) \\ \vdots \\ \gamma kz_{n-1} + \beta k(z_{n-1} - y_{n-1}) = \beta k(y_n - z_{n-1}) \end{cases} \quad (3)$$

94 Substituting Eqs. (2) and (3) into the equations of motion
 95 (1) gives the following equation in matrix form, where \underline{I} is
 96 the identity matrix.

$$m \underline{\ddot{x}} + c \underline{\dot{x}} + \alpha k (\underline{I} - \underline{I}^{-1}) \underline{x} = \underline{0} \quad (4)$$

99 where

$$\underline{L} = \frac{1}{\alpha} \begin{bmatrix} 1 + \alpha + \beta - \frac{\beta^2}{\gamma + 2\beta} & \frac{\beta^2}{\gamma + 2\beta} & 0 & \dots & 0 \\ \frac{\beta^2}{\gamma + 2\beta} & 1 + \alpha + 2\beta - \frac{2\beta^2}{\gamma + 2\beta} & \frac{\beta^2}{\gamma + 2\beta} & 0 & \dots \\ 0 & \frac{\beta^2}{\gamma + 2\beta} & 1 + \alpha + 2\beta - \frac{2\beta^2}{\gamma + 2\beta} & \frac{\beta^2}{\gamma + 2\beta} & \dots \\ \vdots & 0 & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \frac{\beta^2}{\gamma + 2\beta} & 1 + \alpha + \beta - \frac{\beta^2}{\gamma + 2\beta} \end{bmatrix} \quad (5)$$

101 Solving the eigenvalues of Eqs. (4) and (5) while
 102 neglecting the structure damping c would give resonant
 103 frequencies for n degrees of freedom, x_i . However, as the
 104 case shown in (5), \underline{L} is a band matrix that induces non-in-
 105 phase oscillation. From the mathematical viewpoint, the
 106 only way to get the same resonant frequency for all the x_i is
 107 to add $\beta - 2\beta^2/(\gamma + 2\beta)$ into the row-1/column-1 and row-
 108 n /column- n terms. These extra terms represent the extra
 109 "outside beams" that must be added on both sides of the

mirror array for in-phase oscillation behavior as shown in
 Fig. 2(a).

If we regard the matrix \underline{L} as an approximate form shown
 as follows:

$$\underline{L} \approx \lambda' \underline{I} \quad (6)$$

where the equivalent stiffness ratio λ' is expressed by

$$\lambda' = \frac{1}{\alpha} \left(1 + \alpha + 2\beta - \frac{4\beta^2}{\gamma + 2\beta} \right) \quad (7)$$

Then the resonance frequency can be approximated and
 simplified as

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\alpha k}{m} \left(1 - \frac{1}{\lambda'} \right)} \quad (8)$$

A mirror array with only five segments was designed in
 this paper, and the Matlab program was used to verify the
 exact values of resonant frequency according to Eqs. (4) and
 (5). An optimized choice for geometric parameters (α , β
 and γ) was obtained through the comparison between the
 exact and approximate frequency values.

Table 1

The geometric dimensions (μm) of the elastic linkages for the mirror array

Classification	Length	Width	Thickness
Torsional spring (k)	1000	60	15
Another torsional spring (αk)	1000	60	15
Coupled beam (βk)	990	60	15
Constrained spring (γk)	1000	79	15
Outside beam	1150	60	15
Mirror	3000	1650	355

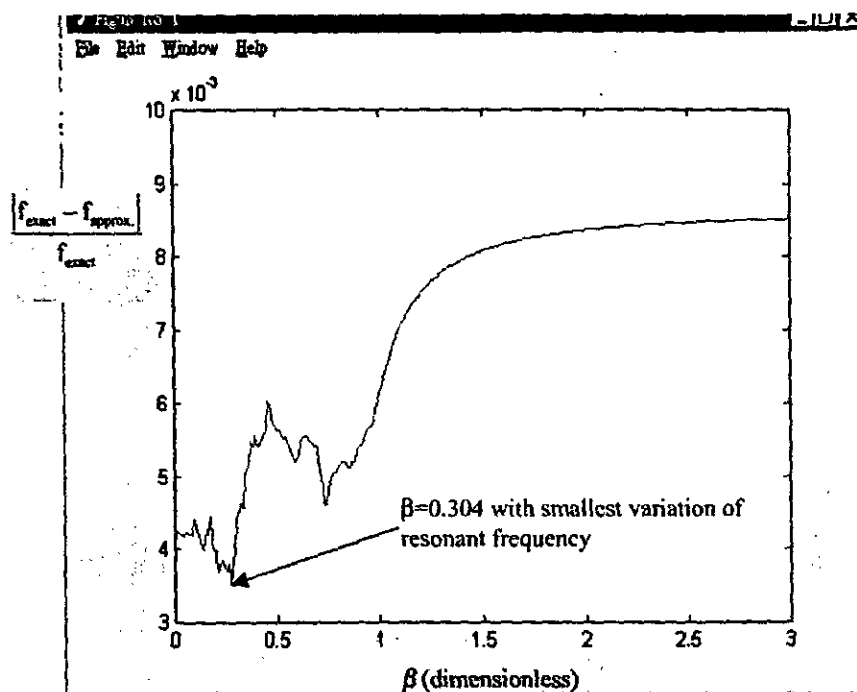


Fig. 4. Frequency variation (between the exact and approximate values) vs. parameter β . The optimum value of β (0.304) corresponds to the smallest frequency variation.

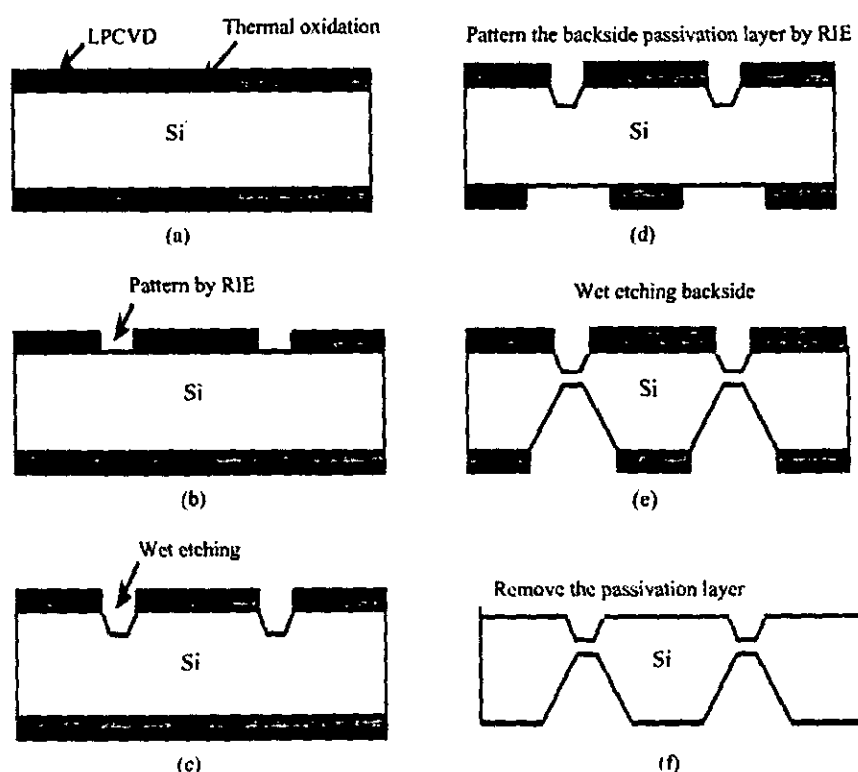


Fig. 5. Fabrication sequence of the micro-mirror array.

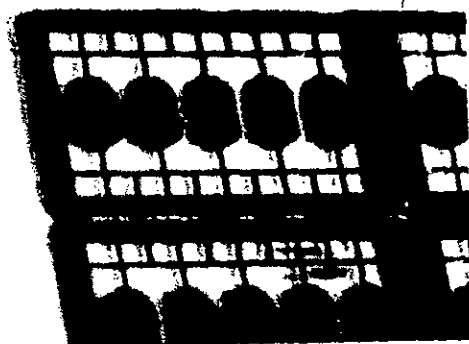


Fig. 6. Fabricated prototype with five mirror segments for each micro-mirror array.

3. Design and fabrication

Table 1 lists the various sizes of the micro-mirror array. The stiffness parameters are calculated for demanded sizes as $\alpha = 1$, $\beta = 0.304$, $\gamma = 2.23$. Substituting the given data into Eqs. (6) and (7) allows us to obtain a resonant frequency of 679 Hz. Meanwhile, the optimal value of β (≈ 0.304) corresponding to the geometry of Table 1 is achieved using the Matlab program to predict the smallest variation of resonant frequencies between the exact and approximate ones shown in Fig. 4.

Fig. 5 depicts the fabrication process. The process starts by growing thermal oxide (3000 Å) and LPCVD nitride (1000 Å) layers on both sides of a double-side polished, n-type {100} silicon wafer with 370 μm thickness as illustrated in Fig. 5(a). In Fig. 5(b), the passivation layer is patterned by RIE (reactive ion etching). The shape of the micro-mirror and the elastic linkages are then defined by silicon anisotropic etching with KOH solution (Fig. 5(c)). The backside passivation layer is also patterned by RIE as shown in Fig. 5(d). In order to suspend the linkage structure, deep anisotropic etching from the backside to the required thickness is performed as shown in Fig. 5(e). Finally, the passivation layer is removed by RIE as shown in Fig. 5(f). The mirror array is finished as shown in Fig. 6.

4. Test systems and results

Fig. 7 depicts the testing system. The characteristics of the fabricated micro-mirror array were verified by an optical interferometer. According to Fig. 7, the mirror array, mounted on a PZT exciter, is positioned on a motorized translation stage to perform a harmonic oscillation. The output of AVID™ (Advanced Vibrometer Interferometer Device, Ahead Optoelectronics Inc., Taiwan) optical interferometer is amplified and converted to a displacement proportional voltage, which is displayed on a PC and measured by a dynamic signal analyzer (DSA). The com-

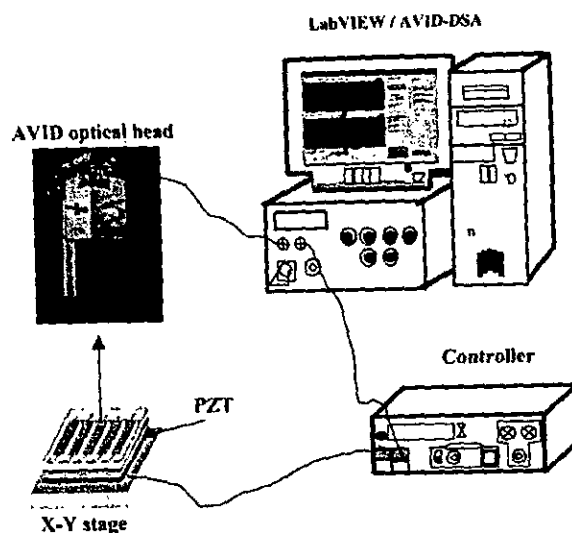


Fig. 7. The experimental set-up for testing the micro-mirror array.

puter that controls the AC current source with programmable amplitude and frequency takes the measurement readings from DSA and processes the test data.

Fig. 8 shows the frequency response for each individual micro-mirror. The 1st common peak of resonant frequency at 724 Hz matches the theoretical value (679 Hz) within the error of 7%. Simultaneously, the time domain response depicted in Fig. 9 shows the almost in-phase vibration for each mirror segment with a maximum phase difference below 1/15 cycle. The phase lag of 1/15 cycle is not sufficient for application. However, this data is tested from the prototype sample with size variation from one mirror segment to another. For example, the thickness of the elastic linkage beams are not identical everywhere, and this error in silicon micromachining induces the different resonant frequencies as well as out-of-phase for each mirror segment intrinsically. By the augmentation of elastic lin-

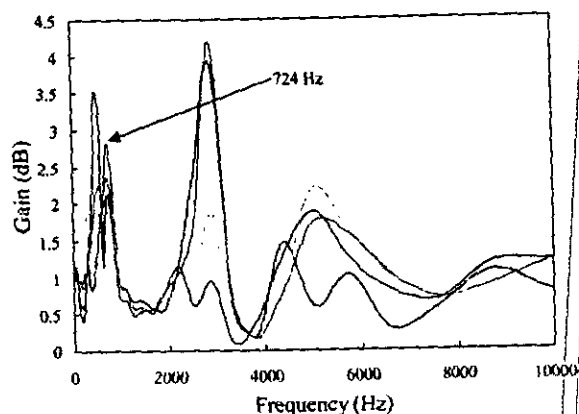


Fig. 8. The individual frequency response of the five mirror segments of the micro-mirror array.

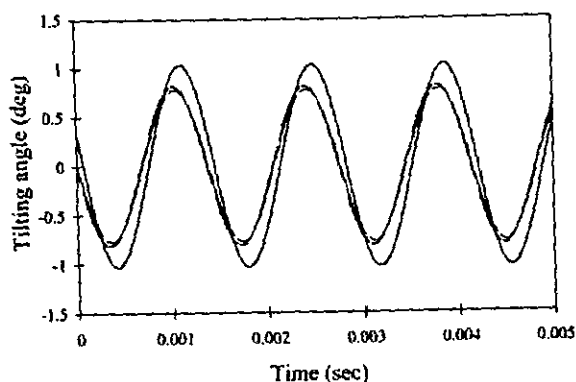


Fig. 9. Curves of tilted angle vs. time for the five mirror segments of the micro-mirror array.

kages, the mirror array retains a concordant vibration with a phase lag of 1/15 cycle in this paper only. Such a kind of micromachining error does reduce some reflective efficiency for the designed mirror array, and is supposed to be modified by the state-of-art technique of silicon bulk-micromachining.

By the limitation of rating voltage of 25 V into the PZT exciter, the tilting angle of the mirror array shown in Fig. 9 is measured to be from 0.75 to 1° only. Stronger excitation ways should be added to this micro-mirror array to produce remarkable tilting angle for practical applications.

5. Conclusions

An in-phase resonating micro-mirror array has been made and tested. A simple MDS mechanical model is constructed to obtain the parametric expression of the resonant frequency with the demanded model shape. The mechanical structures are designed with optimal sizes using theoretical analysis parameters. The theoretical, approximate value of the resonant frequency of the micro-mirror is calculated to be 679 Hz. The periodic microstructures are made by single-crystalline silicon with bulk-micromachining technique. Characteristics of the micro-mirror array are verified by an optical interferometer under harmonic excitation from a PZT stage. Testing resonant frequency of the micro-mirror array is experimentally determined to be 724 Hz, which is close to theoretical value of 679 Hz. In addition, the maximum phase deviation below 1/15 cycle demonstrates the phase synchronization effect of the prototype micro-mirror array.

Acknowledgements

The authors would like to thank Mr. Shyh-Yung Pao, Mr. Jenn-Yi Chen, Mr. Chiyuan Lee, Mr. Fuyuan Xiao and Mr. Hung-Hsuan Lin of the Institute of Applied Mechanics, National Taiwan University, for their assistance in the experiment. In addition, the valuable comments from Mr. Tze-Jung Yao and Miss Yi-Ping Liu of California Institute of Technology (Caltech), USA, are also highly appreciated.

References

- [1] K.-S. Seo et al., Bulk-micromachined silicon micro-mirror for tunable optical switch application, in: ETFA Proceedings of the 1996 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA'96) Part 2 (of 2), Kauai, HI, USA, November 18-21, 1996, pp. 404-407.
- [2] K. Yamada, T. Kuriyama, Novel asymmetric silicon micro-mirror for optical beam scanning display, in: Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'98), Heidelberg, Germany, January 25-29, 1998, pp. 110-115.
- [3] R.S. Langley, Response of two-dimensional periodic structures to point harmonic forcing, *J. Sound Vibration* 197 (4) (1996) 447-469.
- [4] R. Adler, A study of locking phenomena in oscillation, in: Proceedings of the I.R.E. and Waves and Electrons, June 1946, pp. 351-357.
- [5] K.D. Stephan, Inter-injection-locked oscillators for power combining and phase-arrays, *IEEE Trans. Microwave Theor. Tech.* 34 (10) (1986) 1017-1025.

Biographies

Lung-Jieh Yang received his MS degree from Tamkang University, Taiwan in 1991 and PhD degree from the Institute of Applied Mechanics, National Taiwan University, Taiwan in 1997. He joined the faculty as an Assistant Professor at the Department of Mechanical Engineering, Tamkang University in 1997 and was on 1-year leave at California Institute of Technology (Caltech), USA in 2000. His current research interests are in the field of micro-scaled fluid dynamics and micromachining technologies.

Chih-Wei Liu was born in 1975 in Taipei, Taiwan. He received his BS degree in the Department of Mechanical Engineering from Private Chinese-Culture University, Taiwan, in 1998. He is working toward his MS in the Institute of Applied Mechanics, National Taiwan University.

Peizen Chang was born in Chia-Yi, Taiwan, R.O.C., in 1962. He received the BS degree in civil engineering from National Taiwan University, Taipei, Taiwan, in 1984, and the PhD degree in theoretical and applied mechanics from Cornell University, Ithaca, New York, in 1991. His PhD dissertation was an investigation of the mechanics of super-conducting magnetic bearings. He joined the faculty of Institute of Applied Mechanics, National Taiwan University in 1991 and became a full professor in 1999. His current research interests are in the area of micromachined sensors and actuators.

The Zeroth Order Solution of the Velocity Field around Micro Comb Structures with Lateral Oscillation

Lung-Jieh Yang¹, Chi-Yuan Lee² and Ping-Hei Chen²

¹Department of Mechanical Engineering, Tamkang University

151, Yih-Chan Rd., 25137, Tamsui, Taiwan

²Department of Mechanical Engineering, National Taiwan University

1, Sec. 4, Roosevelt Rd., 10617, Taipei, Taiwan

E-mail: ljyang@mail.tku.edu.tw

Abstract

This work models the flow around the comb structure of a surface-machined microaccelerometer as a two-dimensional, time-periodic, incompressible flow with periodic boundary conditions. The corresponding two-dimensional Navier-Stokes equation generally has no analytical solution. However, using small-size scaling, the dominant diffusion mechanism of the micro flow pattern simplifies the governing equations into one set of diffusion equations. Moreover, this investigation presents an analytical approximation combined with the method of separating variables in a complex-variable domain, to solve the two-dimensional diffusion equation of the velocity field.

The SOI-like Method to Reduce the Die Size of Bulk-Micromachined Sensors

Lung-Jieh Yang and Shun-Wen Kang

**Department of Mechanical Engineering, Tamkang University,
No. 151, Yih-Chan Rd., Tamsui, 25137, Taiwan, Republic of China**

Phone: 886-2-26215656 ext. 2768; Fax: 886-2-26209745

E-mail: ljyang@mail.tku.edu.tw

ABSTRACT

This paper proposes a new way to miniaturize bulk-micromachined sensors. A Pyrex glass bonded to a silicon wafer replaces the silicon wafer as a substrate, because the silicon wafer can be machined to a diaphragm afterwards without wasting die area on {111}-faced slopes. Basically, this SOI(silicon-on-insulator)-like method produces sensor dies as small as the surface-micromachined ones and is compatible with different techniques of making diaphragms. A silicon diaphragm on a glass substrate is mono-crystalline and has stable mechanical properties and reproducible behavior. The SOI-like method allows the fabrication of piezoresistive pressure sensors with a die size of 1.0mm x 0.8mm x 0.5mm. Finite element analysis and pressure testing are compared to demonstrate the sensor performance of the prototype.

Keywords: SOI-like, miniaturization, bulk-micromachining

MARCHING VELOCITY OF A CAPILLARY MENISCUS IN MICROCHANNEL

Category: 2, Materials and Device Characterization

Lung-Jieh Yang* and Yu-Chong Tai

California Institute of Technology (USA)

*Tamkang University (Taiwan)

This paper describes a new methodology and model of the marching velocity of a capillary meniscus in a microchannel. We believe this is the first measurement of this kind and further research on this topic will produce many more important microfluidic properties.

To study open surface properties, contact angle measurement is a powerful way. The three interfacial surface forces at the liquid/solid/air interface, which obey Young's law, are depicted in Fig.1 [1], [2]. However, measuring the inner surface properties is much more difficult. A dedicate apparatus for capturing the meniscus images in quartz capillary tubes to measure the meniscus velocity is reported by Sobolev [3]. He changed the gas pressure to control the meniscus to advance or recede, and correlated the gas pressure, position, velocity and dynamic contact angle of a meniscus.

Now, to measure the inner surface properties of a microchannel is very important for microfluidics and bioMEMS, but it is even harder as dimensional control and applications of other controls (e.g., pressure) are difficult. This paper aims to explore a new way of measuring the marching position and velocity of a capillary meniscus in a micromachined channel to interpret microfluidic properties. Experimentally, filling water into a microchannel with different surface status can generate a variety of marching velocities for the same liquid. A one-dimensional model of this is developed here assuming a rectangular cross section, shown in Fig.2. This model is based on the force balance between channel flow and meniscus (Laplace) pressure and the nonlinear differential equation shown in Eq.(1), which constructs the relationship between the momentum change of a fluid column and the pressure gradient due to the surface tension force.

$$\frac{2\rho}{3}L'' + \frac{8\mu}{h^2}L' = \frac{2\gamma_{la}}{(h/\cos\theta)L} \quad [\text{with initial conditions: } L'(0)=0, L(0)=L_0] \quad (1)$$

The time history of a meniscus position L can be computed numerically according to the parameters including liquid dynamic viscosity μ , surface tension of liquid-air interface γ_{la} , channel height h and the dynamic contact angle θ . As the time increasing, the acceleration term L'' in Eq.(1) can be neglected and the marching position follows a square root relationship with respect to time.

$$L(t) = \sqrt{L_0^2 + Dt}, \quad D = \frac{\gamma_{la}h \cos\theta}{2\mu} \quad (D \text{ is a diffusing coefficient}) \quad (2)$$

Experimentally, we fabricated a silicon chip with Parylene microchannels as shown in Fig.3 to perform the water-filling experiment. The meniscus position data for a Parylene channel with the width of $10\mu\text{m}$, subjected to dried, pre-wetted and pretreated (with agents other than water) inner walls, were recorded and plotted in Fig.4. By fitting the secular data according to the square-root Eq.(2), we obtained the diffusing coefficient D as well as the dynamic contact angle θ . Clearly, the square-root dependence is valid and this model fits with the experimental data really well.

As for other properties, the results shown in Table 1 reveal almost identical values of "dynamic" contact angles for different cases of water meniscus in a Parylene microchannel, although the diffusing coefficient D changes across 3 orders of magnitude. This observation is similar to the trend depicted in reference [3], that is, the dynamic contact angles are velocity-independent in the high-speed region (faster than $5\mu\text{m}/\text{sec}$) of a meniscus in a quartz capillary. Both results are different from the conventional hydrodynamic theory (which described that θ is proportional to the cubic root of a meniscus velocity) [4]. With the experimental methodology mentioned in this paper, the inner mechanism of the surface tension driven flow will be manifested more clearly and applied to the fluid-delivery of microfluidic systems. Although a lot more work needs to be done (and is being done), with further development we believe this is the beginning of a very promising new tool for microfluidic study.

Word Count: 598

Submitting author: Lung-Jieh Yang, Tamkang University, College of Engineering, Department of Mechanical Engineering, #151, Yih-Chan Rd., Tamsui, Taipei, 25137, Taiwan (ROC). Tel: +886-2-26215656 ext. 2768, Fax: +886-2-26209745, E-mail: ljyang@mail.tku.edu.tw

REFERENCES

[1] M. Madou, Fundamentals of microfabrication, CRC, p.433, 1997.
[2] J.N. Israelachvili, Intermolecular and Surface Forces, London: Academic, 1992.
[3] V.D. Sobolev, J. Colloid and Interface Science, 222, pp.51-54, 2000.
[4] P.G. de Gennes, Wetting: statics and dynamics, Reviews of Modern Physics, 57(3-I), pp.827-890, 1985.

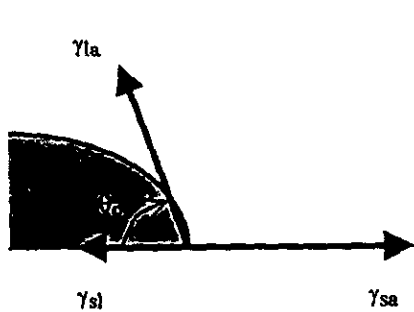


Figure 1: The liquid/solid/air interface of a capillary tube; θ_c is the contact angle. γ denotes surface tension.

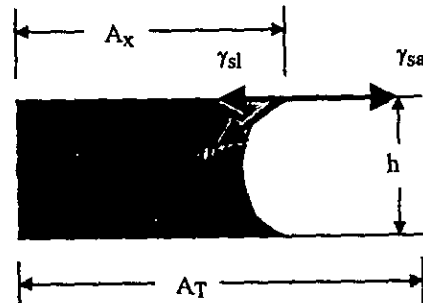


Figure 2: The configuration of a microchannel; h is the channel height. A_x denotes wetting area.

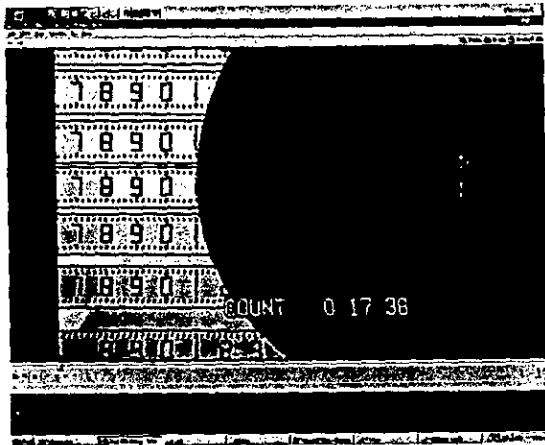


Figure 3: The Parylene channels of 2mm long, with the height of 3 μm , the width of 80, 40, 20, 10 μm (from bottom to top) on a silicon chip. Each small step of the ruler is 20 μm . The water droplet (dark area) serves as a reservoir at inlet.

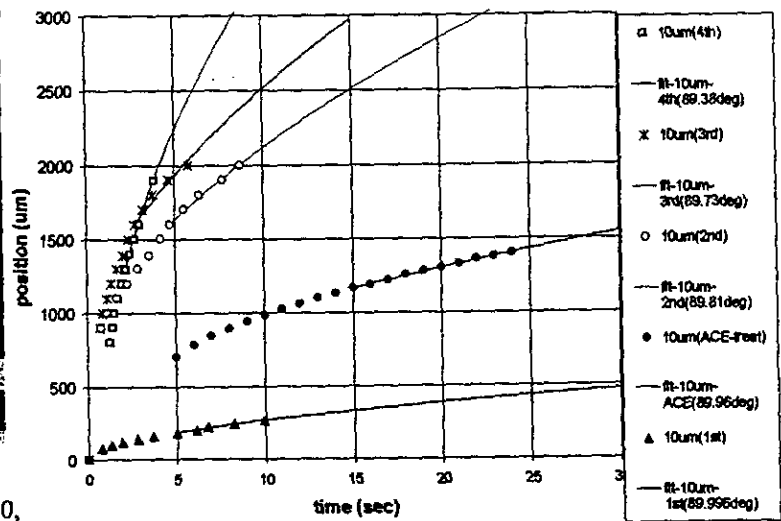


Figure 4: The position of a capillary meniscus vs. time of DI water filling into a Parylene channel. The fitting curves depict the theoretical prediction.

Table 1: The experiment results.

Information of a Parylene microchannel			Diffusing coefficient D ($\mu m^2/sec$) in Eq.(2)	Equivalent dynamic contact angle θ (degree)
Width (μm)	Height (μm)	Water-filling way		
10	3	Pre-treated with acetone for three times before filling water	0.06845	89.96
		1 st time of filling water after stripping PR (dried capillary)	0.007584	89.996
		2 nd time of filling water (pre-wetted capillary)	0.3615	89.81
		3 rd time of filling water	0.5143	89.73
		4 th time of filling water	1.177	89.38

PHOTO-PATTERNABLE GELATIN AS PROTECTION LAYERS IN SURFACE-MICROMACHININGS

Category: 3. Fabrication and Packaging Technology (Poster)

Lung-Jieh Yang*, Tze-Jung Yao and Yu-Chong Tai

California Institute of Technology (USA)

*Tamkang University (Taiwan)

This paper describes a newly developed low-temperature photo-patternable Gelatin technology that is useful to produce a thick ($>10\text{ }\mu\text{m}$) Gelatin protecting and strengthening layer for weak MEMS microstructures (e.g., microfluidic devices). Example demonstrated here is the Gelatin process integrated within a Parylene MEMS technology. What we also report here is the complete processing details and formulae that allow anyone to use Gelatin like photoresist. More importantly, Gelatin is very chemical-resistant and mechanical-robust, which makes it ideal for MEMS applications.

Gelatin has been used for over 6,000 years. It is made of proteins (18 kinds of amino acids) and is regarded as a pure food in the past. The most well known example is the "gummy bears" (shown in Fig.1). The low melting point of Gelatin ($<100^\circ\text{C}$), as indicated in Fig.2, allows it to be formed into any shape by gentle heating/cooking[1]. Interestingly, Gelatin can also be used as a binder in light-sensitive photographic products. Adding some dichromate into Gelatin makes it a photo-patternable material like negative photoresist. That is, the portion of Gelatin exposing to the ultra-violet light becomes cross-linked and has a high selectivity to the warm water. Mechanically, however, Gelatin is very elastic and opposite to photoresist's brittleness. Accordingly, Gelatin has the advantages of normal photoresist but not the disadvantages. This, in fact, has been demonstrated with Gelatin as a protective mask in a sand-blasting process of glass plates[2]. Chemically, Gelatin is vulnerable to acid and base before cross-linking. Figure 3 demonstrates this with a sample coated with Gelatin, followed by standard photolithography (positive photo-resist over pure Gelatin layer). When the top positive-resist is developed, the exposed Gelatin is attacked immediately by the developer (AZ400K). However, with cross-linking using dichromate and UV light, the photo-patterned Gelatin (microns in thickness) becomes water-insoluble and chemical resistant to both acids and bases. Others also observed this chemical resistance of Gelatin. For example, Angus[3] demonstrated that the Gelatin can be used as a gray-scale masking in electroplating some metallic samples. In addition, Gelatin is also plasma resistant (easily more than hours). Figures 4 and 5 show the surfaces of pure Gelatin after dry-etching in O_2 and/or SF_6 plasmas. The surface roughness seems to become worse, but the actual etching rate of the pure Gelatin is below $0.1\text{ }\mu\text{m}/\text{min}$ for 400W of plasma (Technics PEIIA Etcher).

Further more, we report here an example of using Gelatin as the protective and strengthening layers for large-size Parylene microfluidic MEMS. This idea is demonstrated in a process shown in Fig.9. For the conventional fabrication of Parylene surface-micromachined diaphragms or channels, we usually adopt the design of supporting dimples or supercritical drying method to prevent MEMS stiction or collapse. However, the former modifies and changes the geometry of microstructures (hence may cause undesirable effects), while the latter has its problems of delaminating the Parylene structural layers from the substrate due to the penetration of supercritical CO_2 through Parylene. By the use of the photo-patterned thick (up to $10\text{ }\mu\text{m}$ at least) Gelatin, Parylene MEMS structures can be successfully made without stiction problems during the stripping of photoresist sacrificial-layer using acetone. This is possible because the whole photolithographic patterning of Gelatin is a low temperature process (hence does not destroy the already existing sacrificial photoresist) and Gelatin is inert to acetone (and a variety of other organic solutions). As far as we know, no other material/process can fulfill the same requirements, which makes Gelatin a useful material for MEMS fabrication. We believe Gelatin is useful for the MEMS community. Further research on this material will produce more interesting applications.

Word Count: 589

Submitting author: Lung-Jieh Yang, Tamkang University, College of Engineering, Department of Mechanical Engineering, #151, Yih-Chan Rd., Tamsui, Taipei, 25137, Taiwan (ROC). Tel: +886-2-26215656 ext. 2768, Fax: +886-2-26209745, E-mail: ljyang@mail.tku.edu.tw

REFERENCES

- [1] website: www.gelita.com/DGF-english
- [2] W.A. Little, Rev. Sci. Instrum., 55(5), pp.661-680, 1984.
- [3] J.C. Angus, J. Electrochem. Soc., 133(6), pp.1152-1160, 1986.



Figure 1. Gummy bears[1].

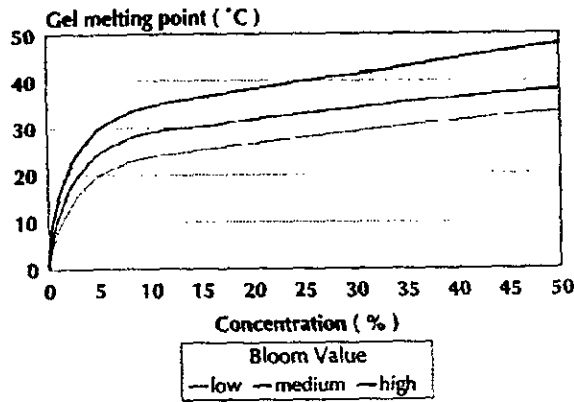


Figure 2. Melting points of Gelatin[1].

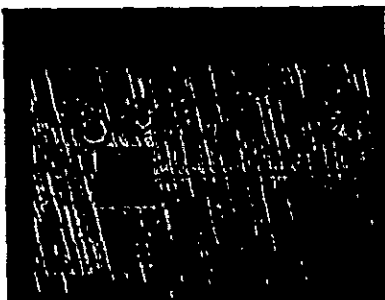


Figure 3. AZ400K attacks the surface of Gelatin (32%) right after the developing of the above resist.



Figure 4. Gelatin (32%) surface after the etching of O₂ plasma, cracks induced from the pure Gelatin underneath.

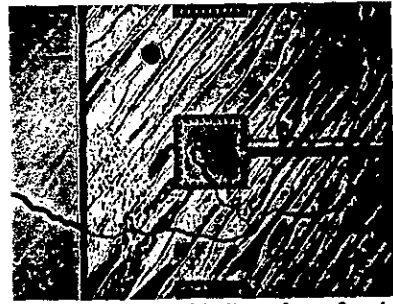


Figure 5. Gelatin (32%) surface after the etching of SF₆ plasma, cracks induced from the pure Gelatin underneath.

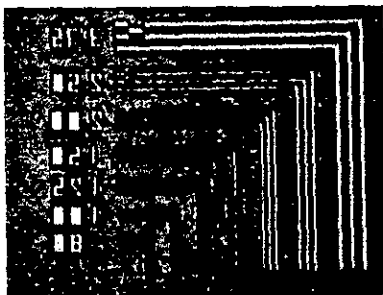


Figure 6. Cross-linked Gelatin (4%) thickness: 0.2um minimum line-width: 1um

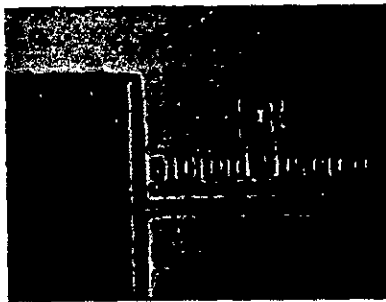


Figure 7. Cross-linked Gelatin (20%) thickness: 2.5um minimum line-width: 10um

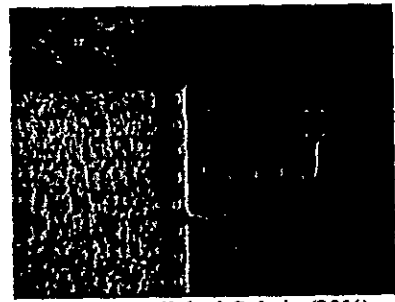


Figure 8. Cross-linked Gelatin (32%) thickness: 6.5um minimum line-width: 10um (meander)

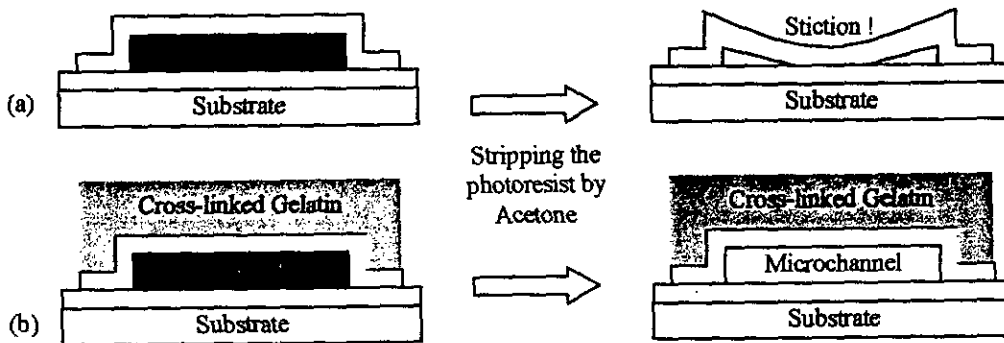


Figure 9. The cross-section view of Gelatin films using as protection layers or stiffeners for the weak microstructures: (a) without Gelatin, (b) with Gelatin.